

Opinnäytetyö (AMK)

Tieto- ja viestintätekniikka

2020

Tuomas Rantala

# ÄÄNITASOMITTARIN PROTOTYYPIN TOTEUTUS DROONILLA SUORITETTAVIIN YMPÄRISTÖMELUMITTAUKSIIN

Tuomas Rantala

# ÄÄNITASOMITTARIN PROTOTYYPIN TOTEUTUS DROONILLA SUORITETTAVIIN YMPÄRISTÖMELUMITTAUKSIIN

Melu on WHO:n mukaan maailman toiseksi pahin ilman välityksellä leviävä terveydelle haitallinen saaste PM<sub>2.5</sub> pienhiukkasten jälkeen. Melu aiheuttaa sydän- ja verisuonitauteja, unihäiriöitä, masennusta ja tarkkaavaisuushäiriöitä. Melumittaaminen on täten tärkeää melun kiistattoman haitallisuuden vuoksi, jotta elinympäristöstä voidaan toteuttaa viihtyisä ja terveellinen. Melua mitataan äänitasomittareilla, jotka ovat desibelimittarin tapaisia mittalaitteita, jotka mittaavat ilmanpaineen vaihtelua eli ääntä. Perinteisin keinoin melumittaaminen vaikeasti tavoiteltavista melulähteistä, kuten savupiipuista, on aikaa vievää ja kallista. Ratkaisuna ongelmaan äänitasomittari sijoitetaan miehittämättömään ilma-alukseen eli drooniin. Droonin avulla äänitasomittarin sijoittaminen on helppoa lähes mihin tahansa. Drooniavusteisiin melumittauksiin ei ole saatavilla äänitasomittareita, joten sellainen tulee suunnitella.

Melumittaamiseen droonilla liittyy ilmiselvä ongelma, drooni itsessään aiheuttaa merkittävän melun, joka häiritsee melumittausta. Ongelman ratkaisemiseksi opinnäytetyötä tehtäessä keksittiin menetelmä ja laite, jolla ongelma voidaan ratkaista. Keksinnölle haetaan patenttia.

Opinnäytetyössä perehdyttiin ääneen, meluun, melumittaukseen ja etenkin melumittaamiseen droonilla, sillä se on uusi konsepti. Tämän jälkeen suunniteltiin ja valmistettiin äänitasomittarimoduulin prototyyppi Aeromon BH-12 päästöjen mittalaitteeseen. Tavoitteena oli saavuttaa joitain IEC 61672-1:2013 -standardissa määritellyjä luokan 1 laitteen teknisiä ominaisuuksia, etenkin taajuusvasteen ja ekvivalentin äänitason laskennan osalta. Lopuksi mittaria testattiin usealla eri testillä. Mittaria verrattiin kaupalliseen äänitasomittariin. Testeissä mittarin todettiin toimivan standardin mukaisesti taajuusvasteen osalta. Ekvivalentin äänitason mittaustulokset erosivat mittalaitteiden välillä, mutta tästä ei voida tietää kumpi laitteista oli oikeassa. Äänitasomittarin toteutus onnistui näin ollen hyvin.

## ASIASANAT:

Ääni, äänenpaine, äänenpainetaso, äänentasomittari, äänitasomittari, drooni, melumittaus

Tuomas Rantala

# IMPLEMENTATION OF SOUND LEVEL METER PROTOTYPE FOR DRONE OPERATED ENVIRONMENTAL NOISE MEASUREMENTS

According to the World Health Organization, noise is the world's second most harmful airborne emission, only after PM<sub>2.5</sub> particulates. Noise causes cardiovascular diseases, sleep disorder, depression and negative economic impacts. Noise measuring is important, due to the undoubtedly harmful nature of noise. Noise is measured with a sound level meter (SLM), which is a decibel meter like device. SLM's measure fluctuations in air pressure, known as sound. Measuring noise from difficult to reach sources such as smokestacks is difficult and costly in the known art of sound measuring. A SLM is attached to a drone, to overcome these difficulties. With a drone it is easy to position SLM's almost anywhere. Currently there are not any SLM's available that would be suitable for drone operated measurements, therefore one must be designed.

There is an obvious issue with drone operated noise measuring. The drone itself causes significant noise, which compromises the noise measurement. A method and apparatus were invented to solve this issue. The invention has a patent pending.

In this thesis, a quick overview was taken to sound, noise and noise measuring. Especially drone operated noise measuring was researched, as it is a new concept. After this an SLM-module for Aeromon BH-12 emission measuring device was designed, manufactured and tested. The goal was to comply with some of the requirements for a class 1 device defined in the IEC 61672-1:2013 -standard. Especially the frequency responses of the frequency weightings and equivalent sound pressure level calculation's accuracy had to comply with the standard. In the end, the SLM was tested with various test, and compared with a standard SLM. In the tests, the SLM proved to meet the set requirements, regarding the frequency weightings. The equivalent sound pressure level results differed between the SLM's. However, one cannot know which of the devices was right. Therefore, the SLM prototype made in the thesis was a success.

## KEYWORDS:

Sound, sound pressure, sound pressure level, sound level meter, drone, noise measuring

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>10</b>
<b>2 ÄÄNI, MELU JA MELUMITTAUS</b>	<b>12</b>
2.1 Äänen nopeus	12
2.2 Äänen taso	13
2.3 Melu	14
2.4 Melumittaus	14
2.4.1 Aikapainotus	15
2.4.2 Taajuuspainotus	16
2.4.3 Melumittaus droonilla	17
<b>3 ÄÄNITASOMITTARI</b>	<b>21</b>
3.1 Toiminta ja rakenne	21
3.2 Mikrofoni	23
<b>4 ETÄISYYSMITTAUS</b>	<b>25</b>
4.1 Etäisyysmittauksen epävarmuuden vaikutus melumittauksen tulokseen	25
4.2 Vertailua	28
4.3 Valinta	30
4.4 Ensitestaus	30
4.5 Signaalinkäsittely	33
4.5.1 Setup- ja loop-metodit	33
4.5.2 Trigger- ja getDc-metodit	34
4.5.3 TargetDetector-metodi	34
4.5.4 TargetProcessor- ja printTargets-metodit	35
4.6 Jatkotestaus	35
4.6.1 Mittaus 1	38
4.6.2 Mittaus 2	38
4.6.3 Mittaus 3	39
4.6.4 Mittaus 4	39
4.6.5 Mittaus 5	39
4.6.6 Mittaus 6	40

4.6.7 Mittaus 7	41
4.7 Yhteenveto	41
<b>5 ELEKTRONIIKKA</b>	<b>42</b>
5.1 IEPE-mikrofoni	43
5.2 Jännitelähde	44
5.3 Virtalähde	47
5.4 Audio-osio	50
5.5 Piirilevyn suunnittelu	50
5.6 Piirilevyn testaus	53
5.6.1 DC-toiminta	53
5.6.2 Audio-osio	54
<b>6 OHJELMISTO, INTEGROINTI JA VIIMEISTELY</b>	<b>56</b>
6.1 Audio-signaalinkäsittely	57
6.1.1 Fourier-muunnos	59
6.2 Kalibrointi	61
6.3 Moduulin viimeistely	61
<b>7 TESTAUS</b>	<b>63</b>
7.1 Äänitasokalibraattori	63
7.2 Taajuusvaste	64
7.3 Kompressori	65
7.4 Auton moottori	65
<b>8 POHDINTAA</b>	<b>67</b>
<b>9 YHTEENVETO</b>	<b>68</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>69</b>

## **LIITTEET**

Liite 1. Etäisyysanturin sulautetun ohjelmiston pseudokoodi lohkokaavio.

Liite 2. Taajuusvastemittaukset eri taajuuspainotuksille.

# KUVAT

Kuva 1. Aeromon BH-12 päästöjen mittalaite (kuva Aeromon Oy).	11
Kuva 2. Havainnollistava kuva IEC 61672-1:2013 aikapainotuksista (kuva NTi Audio AG) [9].	16
Kuva 3. IEC 61672-1:2013 -standardin määrittelemät taajuusvasteet A, C ja Z - taajuuspainotuksille.	17
Kuva 4. Yksinkertaistettu kuva patenttihakemuksesta.	20
Kuva 5. Norsonic Nor140 -äänitasomittari, Nor1209 -esivahvistimella ja Nor1225 - mikrofonilla.	21
Kuva 6. Norsonic Nor1256 -äänitasokalibraattori, kalibraattorin suojakotelo ja Nor4583- sekä GRAS RA0341- mikrofoniaadapterit.	22
Kuva 7. Esipolarisoitu GRAS 146AE 1/2" CCP vapaakenttämikrofoni, BNC-liittimellä.	24
Kuva 8. Etäisyysmittauksen epävarmuuden vaikutus melumittauksen epävarmuuteen.	27
Kuva 9. MaxBotix MB7076 XL-MaxSonar-WRLA1 -etäisyysanturi (kuva MaxBotix Inc.) [23].	30
Kuva 10. Ruudunkaappaus oskilloskoopin näytöstä, jossa on nähtävissä liipaisupulssi kanavalla 1 ja anturin "analog envelope"- signaali kanavalla 2.	32
Kuva 11. Piippua simuloiva pahviputki ja mittatila.	36
Kuva 12. Mittausjärjestely, jossa p1...p6 ovat suoraan linjaan 1 m välein merkityt mittapisteet, joihin putki asetoitiin siten, että sen etureuna oli mittapisteessä. $\alpha$ on kulma anturin keskilinjan sekä mittapisteiden keskilinjan välillä.	37
Kuva 13. Jossa $p\Delta$ on toisen piipun siirtosuunta ja matka.	40
Kuva 14. Etäisyysanturin varjostustesti.	41
Kuva 15. Bela Mini-kehityskortti.	42
Kuva 16. Elektroniikan toteutus lohkokaavio.	43
Kuva 17. Boost-tyyppinen hakkuri jännitelähde.	44
Kuva 18. LTSpice transienttisimulaatio hakkurista 4 mA kuormalla.	45
Kuva 19. Suunniteltu jännitelähteen kytkentäkaavio komponenttiarvoineen.	46
Kuva 20. Oskilloskoopilla mitattu ac-jännite kytkennän 24V_pre_filter solmussa.	46
Kuva 21. TIDA-010045 referenssikytkentä [27].	47
Kuva 22. TL431-datalehden esimerkkikytkentä [28].	48
Kuva 23. Suunniteltu virtalähteen kytkentäkaavio komponenttiarvoineen.	49
Kuva 24. Audio-osion kytkentäkaavio komponenttiarvoineen.	50
Kuva 25. Piirilevyn layout, punainen kuvaa etupuolen kuparitasoa ja vihreä taustapuolen kuparitasoa.	51
Kuva 26. Piirilevyn layoutin taustapuolen kuparitaso.	52
Kuva 27. PcbNew ohjelman avulla tehty 3D-malli piirilevystä.	52
Kuva 28. GRAS 146AE vasteet äänitasokalibraattoriin.	55
Kuva 29. Äänitasomittarin ohjelmiston lohkokaavio.	57
Kuva 30. Hann-ikkuna.	58
Kuva 31. DFT.	60
Kuva 32. Valmis prototyyppi.	62
Kuva 33. Moduuli kiinnitettynä BH-12 mittalaitteeseen.	62
Kuva 34. Mittarin taajuusvaste eri taajuuspainotuksilla. (tehty liitteen 2 mittaustuloksista)	64
Kuva 35. BMW N43B16 -moottorin mittausjärjestely.	66

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

$L_{eqT}$ [dB]	Keskimääräinen äänenpainetaso ajanjaksolla $T$ , lasketaan integroimalla äänenpainetasoja $L_p$ ajanjakson $T$ yli
$L_p$ [dB]	Äänenpainetaso (engl. SPL, sound pressure level), tarkasteltavan äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen tehollisarvon suhteen kaksikymmentäkertainen kymmenlogaritmi
$p_0$ [Pa]	Vertailuäänepaine äänenpainetasolaskennassa, yleensä 20 $\mu$ P
$M$ [dB]	Tarvittava ero mitattavan melun ja taustamelun välillä, lasketaan kahden äänenpainetason erotuksena
$T$ [s]	ajanjakso
$f$ [Hz]	Taajuus
$p$ [Pa]	Äänenpaine, hetkellisen ilmanpaineen ja vallitsevan ilmanpaineen ero, yleensä tehollisarvona
$r$ [m]	Etäisyys
$t$ [s]	aika
$\Delta$	Delta, ero kahden arvon välillä
$\theta$ [°] tai [rad]	Kulma
$\varphi$ [°] tai [rad]	Kulma
A/D-muunnin	Analogia-digitaalimuunnin
Aikapainotus-F	Nopea aikapainotus
Aikapainotus-S	Hidas aikapainotus

Arduino	Avoimen laitteiston elektroniikka-alusta ja ohjelmointiympäristö
Bela Mini	Avoimen laitteiston audio-kehityskortti
Bela	Avoimen laitteiston sulautettu alusta ääniprojekteille
drooni	Kevytrakenteinen, miehittämätön ilma-alus
Eristehilatransistori	(engl. MOSFET, Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)
Heräte	Äänen aiheuttama signaali mikrofoniin
IEC 61672-1:2013	Standardi, joka määrittää äänitasomittareiden tekniset vaatimukset
Kehityskortti	Mikrokontrollerin ja lähtö- ja sisääntulopinnejä sisältävä piirilevy
Taajuuspainotus-A	Ihmisen kuuloalueella 20 Hz – 20 kHz määritelty taajuuspainotus, joka on ihmiskorvan taajuusvastetta vastaava, yleisin käytetty taajuuspainotus
Taajuuspainotus-C	A-taajuuspainotusta neutraalimpi taajuuspainotus etenkin matalilla taajuuksilla, käytetään usein kovien äänten mittamiseen
Taajuuspainotus-Z	Neutraali taajuuspainottamaton vaste 10 Hz – 20 kHz, alueella
Äänitasokalibraattori	Laite, jolla äänitasomittari kalibroidaan tiedetyllä vakioäänenpaineella, vakioäänenpaine on yleensä 1 Pa tai 10 Pa
Äänitasomittari	Äänitasoja mittaava mittalaite
AC	Vaihtojännite
ACS	Aeromon Cloud Service, pilvipalvelu, josta näkee Aeromon BH-12 -mittalaitteen mittaustulokset



BH-12	Aeromon Oy:n päästöjen mittalaite
C++	Ohjelmointikieli
dB	Desibeli, arvon ja vertailuarvon logaritminen suhde
DC	Tasajännite
DFT	Diskreetti Fourier-muunnos (engl. Discrete Fourier transform)
ESR	Kondensaattorin tai kelan sisäinen sarjavastus (engl. equivalent series resistance)
FFT	Nopea Fourier-muunnos (engl. fast Fourier transform)
IDE	Ohjelmointiympäristö (engl. Integrated Development Environment)
IDFT	Käänteinen diskreetti Fourier-muunnos (engl. Inverse Discrete Fourier transform)
IEPE	Integroitu pietsosähköinen sensori, (engl. Integrated Electronics Piezo-Electric)
IFFT	Käänteinen Nopea Fourier-muunnos (engl. Inverse fast Fourier transform)
KiCad	Avoimen lähdekoodin elektroniikan suunnitteluohjelmisto
Pin	Pinni, eli elektroniikkakomponentin jalka
PM <sub>2,5</sub>	0,1 – 2,5 µm kokoisia pienhiukkasia
SPL	Äänenpaine (engl. sound pressure level)

# 1 JOHDANTO

Melun mittaaminen vaikeasti tavoiteltavista melulähteistä kuten korkeista savupiipuista tai myrkyllisten kaasujen tai nesteiden lähettyviltä on vaikeaa, sillä äänitasomittarin sijoittaminen lähelle melulähdettä on kallista, työlästä tai jopa mahdotonta. Perinteisin keinoin esimerkiksi savupiipun melun mittaaminen vaatii nosturin, jonka käyttö on kallista ja hidasta. Ratkaisuna äänitasomittari kiinnitetään miehittämättömään drooniin, jonka avulla on kustannustehokasta sijoittaa äänitasomittari lähes mihin vain.

Opinnäytetyön aiheena on suunnitella, rakentaa ja testata Aeromon BH-12 päästöjen mittalaitteeseen kiinnitettävä äänitasomittarimoduulin prototyyppi tukimittauksineen. Moduulin tulee olla kevyt ja pienikokoinen, jotta se soveltuu tarkoitukseen. Markkinoilla ei ole saatavilla droonilla suoritettaviin mittauksiin tarkoitettuja äänitasomittareita, joten tässä opinnäytetyössä toteutettava mittari on mahdollisesti ensimmäinen laatuaan. Tavoitteena on saavuttaa joitakin IEC 61672-1:2013 "Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications"-standardin määrittämän luokan 1 laitteen suorituskäytännön vaatimuksista. Standardissa on äänitasomittarille noin 250 vaatimusta [1]. Opinnäytetyössä tehtävän mittarin ei tule vielä täyttää kaikkia vaatimuksia, sillä kaikki vaatimukset eivät ole *prototyypin* käytännön suorituskäytännön kannalta relevantteja. Tärkeimpinä tavoitteina pidetään taajuuspainotusten toimivuutta ja ekvivalentin äänitasonlaskennan tarkkuutta. Valmista prototyyppiä tullaan vertamaan Norsonic Nor140 -äänitasomittariin. Nor140 on luokan 1 laite. Vertailun perusteella päätellään ilman virallisia testejä, että onko mittari suorituskäytännöltään standardin täyttävä. Mittaria tullaan jatkokehittämään päätelmien perusteella, opinnäytetyön jälkeen.

Theseus-tietokannasta löytyy hakusanalla "äänitasomittari" vain yksi opinnäytetyö, jossa suunnitellaan äänitasomittari. Kyseisessä opinnäytetyössä suunniteltu laite ei oikeastaan ole äänitasomittari, vaan pikemminkin äänitasoilmaisin. Mittarissa mikrofonin signaali puoliasuunnotetaan, ja varsinaista äänitason laskentaa ei laitteessa tapahdu. Laite ei tiedä äänitasosta muuta, kuin että onko se enemmän vai vähemmän kuin laitteeseen asetettu dimensioton vertailuarvo. [2]

Opinnäytetyön toimeksiantaja Aeromon Oy on helsinkiläinen lentolaitteavusteisiin päästömittauspalveluihin erikoistunut startup-yritys. Aeromon on kehittänyt oman, kevyen droonin hyötykuormaksi soveltuvan BH-12 päästöjen mittalaitteen. BH-12 mittalaitteeseen voi kiinnittää sensorimoduuleita mallista riippuen maksimissaan 3 – 11. Tyypillisesti

BH-12-sensorimoduulit mittaavat kaasuja tai pienhiukkasia ilmasta. Opinnäytetyössä suunniteltavasta äänitasomittarista tulee sensorimoduuli Aeromon BH-12 mittalaitteeseen. [3]



Kuva 1. Aeromon BH-12 päästöjen mittalaite (kuva Aeromon Oy).

Opinnäytetyössä perehdytään aluksi ääneen, meluun ja melumittaukseen. Etenkin melumittausta dronilla tutkitaan, sillä se on uusi konsepti. Tiedettävästi yksikään taho maailmassa ei tällä hetkellä (6/2020) suorita melumittauksia dronilla. Seuraavaksi työssä suunnitellaan äänitasomittarin prototyyppi, joka sisältää myös etäisyysanturin. Lopuksi äänitasomittarin suorituskky testataan, ja testien perusteella tehdään johtopäätöksiä.

## 2 ÄÄNI, MELU JA MELUMITTAUS

Ääni on kaasussa, nesteessä tai kiinteässä väliaineessa etenevää pitkittäistä aaltoliikettä. Tässä opinnäytetyössä keskitytään vain kaasuihin, sillä äänitasomittari mittaa kaasuissa tapahtuvaa ilmanpaineen vaihtelua. Ilmanpaine tarkoittaa jonkin pinta-alan yllä olevan ilmakehän yläosaan ulottuvan ilmapatsaan aiheuttamaa painoa kyseiseen pinta-alaan. Ilmanpaineelle on useita yksiköitä, joista nykyisin yleisin käytössä oleva on Pascal [Pa]. Pascal on SI-järjestelmän perusyksiköin ilmaistuna:

$$Pa = \frac{kg}{m \times s^2}, \quad (1)$$

johdannaisyksiköillä ilmaistuna yksi pascal on yhden newtonin yhdelle neliömetrille aiheuttama paine. Normaali ilmanpaine merenpinnan tasolla on noin 101,325 kPa, tämä paine muuttuu sää- ja ilmasto-olosuhteiden mukaan. Ilmanpaine heikkenee korkeuden funktiona eksponentiaalisesti, sillä tarkasteltavan alan yllä olevan ilmapatsaan tilavuus pienenee, kun alaa nostetaan korkeammalle merenpinnasta. Lisäksi painovoima vetää ilmakehän molekyylejä voimakkaammin puoleensa lähellä maan pintaa, aiheuttaen suuremmalla voimalla suuremman paineen. Ääni on pitkittäisin aaltoliikkein etenevää vaihtelua vallitsevassa ilmanpaineessa.

Nuoren ihmisen kuuloalue taajuustasossa on noin 20 – 20 000 Hz, alle 20 Hz:n ääniä kutsutaan infraääniksi ja yli 20 kHz:n ääniä ultraääniksi.

### 2.1 Äänen nopeus

Äänen nopeus  $v$  [m/s] kaasussa voidaan laskea kaavalla:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (2)$$

jossa  $\gamma$  on väliaineen lämpökapasiteettien suhdetta kuvaava skalaarinen suure (adiabaattinen vakio), joka on ilmalle 1,40,  $R$  on kaasuvakio, joka on arvoltaan noin 8,3144621 J / (K × mol),  $T$  on kaasun absoluuttinen lämpötila kelvineinä [K] ja  $M$  on kaasumolekyylien keskimääräinen massa, joka on pääosin typestä ja hapestä koostuvalle ilmalle noin  $28,8 \times 10^{-3}$  kg/mol. [4]

Kaavaan (2) sijoittamalla saadaan äänen nopeudeksi 20,00 °C:ssa ilmassa noin 344 m/s. Äänen nopeudesta ilmassa käytetään usein vakiota 343 m/s. Äänen nopeutta voidaan myös aproximoida kaavalla [5]:

$$v = (331,3 + 0,606T), \quad (3)$$

jossa  $T$  on lämpötila [C°]. Kaavalla (3) äänen nopeudeksi saadaan vastaavasti 343 m/s. Kaavan (3) tarkkuus on riittävä useimpiin tarkoituksiin, mukaan lukien myös tämän opin-  
näytetyön tarkoituksiin.

## 2.2 Äänen taso

Äänentaso on kuuloaistin logaritmisen luonteen vuoksi usein mielekästä ilmaista äänen-  
painetasona (engl. SPL, sound pressure level)  $L_p$  [dB] äänenpaineen  $p$  [Pa] sijasta.  $L_p$ :n  
arkipäiväinen termi on "desibeli". Desibeli on arvon sekä vertailuarvon suhde logaritmi-  
sella asteikolla. Äänenpainetaso  $L_p$  voidaan laskea kaavalla:

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right), \quad (4)$$

jossa  $p$  on mitattu äänenpaine [Pa] ja  $p_0$  on vertailuarvo [Pa].  $p_0$  on usein 20 µPa, joka  
on nuoren ja terveen ihmisen kuulokynnystä vastaava äänenpaine. Siis  
20 µPa  $\equiv$  0 dB SPL. Ääni voi olla siis myös alle 0 dB SPL, mutta ihmiskorva ei ole tar-  
peeksi herkkä havaitsemaan näin hiljaisia ääniä.

Energian säilymisen laista johtuen, pallomaisen äänenpainerintaman intensiteetti  $I$  vai-  
menee käänteisen neliön lain mukaan, laskien neljännesosaan etäisyyden kaksinker-  
taistuessaa [4]. Äänenpaine  $p$  taas vaimenee etäisyyteen kääntäen verrannollisesti:

$$p \sim \frac{1}{r}, \quad (5)$$

jossa  $r$  on etäisyys. Myös äänenpainetaso vaimenee etäisyyteen kääntäen verrannolli-  
sesti. On huomattava, että ilmakehä absorboi ääntä taajuuden, ilmakehän kosteuden ja läm-  
pötilan funktiona, tämä absorptio on kuitenkin tyypillisissä droonimittausolosuhteissa alle  
0,01 dB/m [6]. Muutaman metrin etäisyydeltä tehtävissä droonimittauksissa ilmakehän  
absorptio on täten olematonta, tämä otetaan kuitenkin huomioon kalibroimalla äänitaso-  
mittari käyttöolosuhteissa.

## 2.3 Melu

Melu on ei-toivottua, epämiellyttävää, häiritsevää tai kuulolle haitallista ääntä. WHO:n mukaan melu on maailman toiseksi pahin terveydelle haitallinen saaste  $PM_{2.5}$  pienhiukkasten jälkeen.  $PM_{2.5}$  tarkoittaa  $0,1 - 2,5 \mu m$  kokoisia pienhiukkasia, joita syntyy kaikissa polttoprosesseissa kuten moottoreissa ja teollisuudessa. Melu aiheuttaa sydän- ja verisuonitauteja, unihäiriöitä, masennusta ja tarkkaavaisuushäiriöitä. Jo tie- ja kiskoliikenteen aiheuttamasta melusta syntyy Euroopassa vuosittain 40 miljardin euron sosiaaliset kustannukset. Melulähteitä on useita, joista merkittävimpiä ovat liikenne, teollisuuslaitokset, LVIS-laitteet, tilapäiset tapahtumat ja työ- koneet sekä laitteet. Liian kova ääni aiheuttaa kuulovaurion. Pitkäkestoinen altistuminen äänelle madaltaa äänitasoa, jolla kuulovaurio aiheutuu. Altistumisaika puolittuu, kun melutaso nousee 6 dB. Tämä johtuu siitä, että 6 dB:n nousu äänitasossa kaksinkertaistaa äänenpaineen. Näin ollen äänenpaineen kertymä on sama. [7, 8]

## 2.4 Melumittaus

Melun haitallisuuden vuoksi, melumittaaminen on tärkeä osa viihtyisän ympäristön suunnittelua, sekä toteutusta. Melumittauksen tuloksia käytetään hyödyksi meluntorjunnassa, jolla tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla elinympäristöstä saadaan terveellinen ja viihtyisä. Meluntorjuntalainsäädäntö on Suomessa ja länsimaissa yleensä melko kattava. Suomessa meluntorjunnan keskeiset tavoitteet on esitetty ympäristönsuojelulaissa 527/2014 sekä ympäristönsuojeluasetuksessa 713/2014. Melumittauksia koskee useat standardit, esimerkiksi piippumelumittauksissa voidaan soveltaa DIN 45 635-47-KL 3 -standardia. Käytettävä standardi valitaan mitattavan kohteen mukaan. Mittaus, jota ei ole tehty jonkin standardin mukaan, ei ole korvatuntumalla tehtyä mittausta parempi, sillä sitä ei voi verrata muihin mittauksiin, eikä tällöin voida olla myöskään varmoja mittauksen epävarmuudesta.

Melua mitataan äänitasomittareilla, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 3. Äänitasomittari tulee aina kalibroida ennen mittausta siinä kokoonpanossa, jossa sitä tullaan mittaauksessa käyttämään. Yleensä melusta mitataan ekvivalentti äänitaso  $L_{eqT}$ , jonka arvon äänitasomittari laskee automaattisesta ennalta määritellyltä ajanjaksolta  $T$ .  $L_{eqT}$  lasketaan integroimalla äänitasoja  $L_p$  ajanjakson  $T$  yli, kaavalla:

$$L_{eqT} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt \right), \quad (6)$$

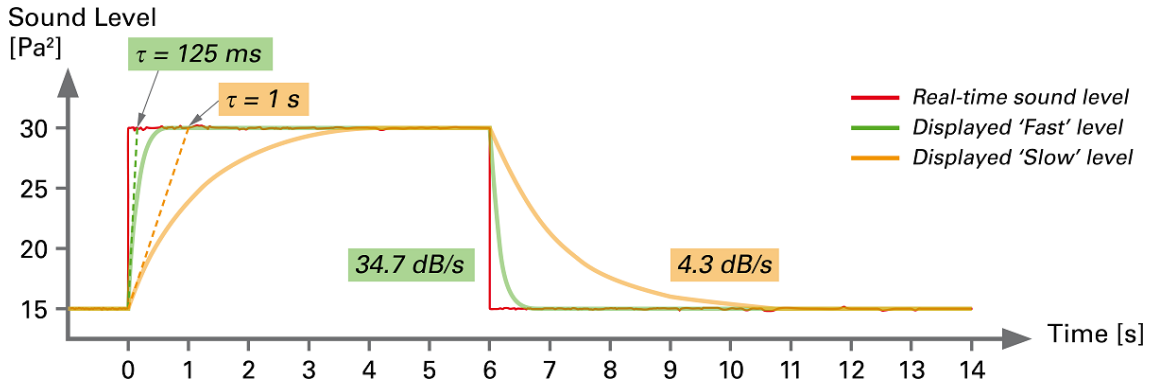
jossa  $t_1$  on määrätyn ajanjakson  $T$  alkuhetki,  $t_2$  on määrätyn ajanjakson  $T$  loppuhetki ja  $L_p$  on tarkasteltavan äänitason hetkellisarvo [dB]. Ekvivalentti äänitaso tarkoittaa äänenpainetason keskiarvoa tietyltä ajalta. Äänenpainetasot ( $L$ ) ja äänenpaineet ( $p$ ) voidaan ilmoittaa luvussa 2.4.1 esitellyin aikapainotuksin- F ja S, sekä luvussa 2.4.2 esitellyin taajuuspainotuksin- A, C ja Z, kun  $L$ :lle tai  $p$ :lle lisätään kyseisen painotuksen nimen alaindeksi. Esimerkiksi  $L_{AF}$  on äänenpainetaso A-taajuuspainotuksella ja F-aikapainotuksella, vastaavasti  $L_{ZeqT}$  on ekvivalentti äänitaso Z-taajuuspainotuksella ja  $p_A$  on äänenpaine A-taajuuspainotuksella.  $L_{eq}$  ei ole riippuvainen aikapainotuksesta [1].

### 2.4.1 Aikapainotus

Aikapainotus tarkoittaa äänenpainetason eksponentiaalista funktiota ajan suhteen tietyllä aikavakiolla, toisin sanoen näytettävän äänenpainetason muutoksien hidastamista. Tämä helpottaa lukemien tulkitsemista etenkin, jos ääni on muuttuvaa. Aikapainotukset ovat jääne ajalta ennen digitaalisia ja integroivia äänenpainemittareita, jolloin mittareissa oli analoginen viisari, joka näytti äänenpainetason. Viisarien muutosnopeus vaihteli mittareiden välillä, lyhyt ja kevyt viisari heilui nopeammin kuin pitkä ja painava. Tämä vääristi mittaustuloksia. Ongelman ratkaisemiseksi kehitettiin standardisoidut aikapainotukset, jotka määrittivät viisarien muutosnopeuden. Viisarit pystyttiin myös kalibroimaan standardia vasten, jolloin mittaustuloksista tuli vertailukelpoiset.

Nykyiset integroivat äänitasomittarit eivät integroivan luonteensa takia tarvitsisi aikapainotuksia, mutta aikapainotuksia käytetään yhä, koska mittauksia ja laitteita koskevat standardit ovat osin ajalta ennen integroivia mittareita. Aikapainotuksista luopuminen tarkoittaisi myös sitä, että vanhojen painotettujen ja uusien painottamattomien mittauksien vertailu ei olisi triviaalia.

Aikapainotuksina käytetään painotuksia F ja S, kirjaimet tulevat englannin kielen sanoista "fast" ja "slow". Standardissa IEC 61672-1:2013 aikavakio  $\tau$  määritellään olevan F-painotuksella 125 ms ja S-painotuksella 1 s. Äänenpainetaso määritellään vaimentuvaksi F-painotuksella 34,7 dB/s, ja S-painotuksella 4,3 dB/s kun sähköinen 4 kHz sini-aalto sisääntulo signaali päätetään äkillisesti. [1] Kuva 2 havainnollistaa aikapainotusten toimintaa.



Kuva 2. Havainnollistava kuva IEC 61672-1:2013 aikapainotuksista (kuva NTi Audio AG) [9].

F- Aikapainotettu ja A-taajuuspainotettu äänenpainetaso  $L_{AF}(t)$  voidaan laskea kaavalla:

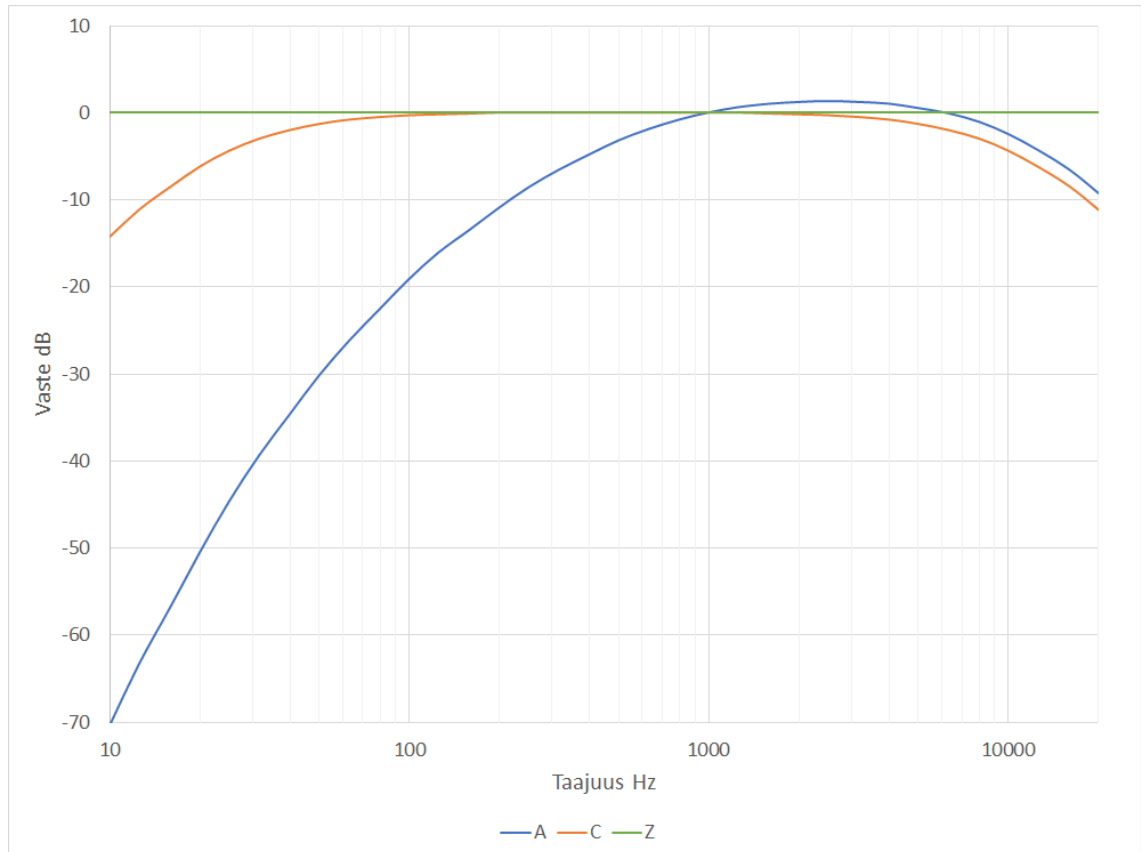
$$L_{AF}(t) = 10 \log_{10} \left( \frac{\left( \frac{1}{\tau_F} \right) \int_{-\infty}^t p_A^2(\xi) e^{-\frac{(t-\xi)}{\tau_F}} d\xi}{p_0^2} \right), \quad (7)$$

jossa  $\tau_F$  on standardin määrittämä aikavakio F tai S ( $\tau_S$ ) sekunneissa [s],  $\xi$  on integroinnin apuna käytettävä aika menneisyydestä tarkasteltavaan ajanhetkeen  $t$  saakka,  $p_A(\xi)$  on A-taajuuspainotettu hetkellinen äänenpaine [Pa] ja  $p_0$  on vertailuarvo [Pa] [1].

#### 2.4.2 Taajuuspainotus

Mikrofonien taajuusvaste on usein lähellä ideaalista, ihmiskorvan taajuusvaste taas ei ole, tämän takia mittaustuloksia muutetaan taajuuspainotuksilla, jotta tulokset vastaisivat lähemmin ihmisen kuulemaa ääntä. Nykyisin käytössä on 3 eri taajuuspainotusta, A, C ja Z. Z-taajuuspainotus on neutraali, ideaalinen vaste. A-taajuuspainotus on lähellä ihmiskorvan taajuusvastetta ja on useimmin käytetty painotus. C-taajuuspainotus on kuten A, mutta sen taajuusvaste on huomattavasti neutraalimpi alle 1 kHz:n taajuuksilla. Ihmiskorvan taajuusvaste on riippuvainen äänenpainetasosta, kovemilla äänenpainetasoilla vaste on neutraalimpi. Kovien äänien mittaamisessa käytetäänkin usein C-taajuuspainotusta. Kuvassa 3 on IEC 61672-1:2013 -standardin määrittelemät taajuusvasteet, jotka voidaan laskea kaavoilla (31), (32) ja (33).





Kuva 3. IEC 61672-1:2013 -standardin määrittelemät taajuusvasteet A, C ja Z -taajuuspainotuksille.

#### 2.4.3 Melumittaus droonilla

Melumittaaminen droonilla on suhteellisen uusi konsepti, josta ei vielä löydy merkittävää määrää kirjallisuutta. IEEE-tietokannasta löytyy hakusanoilla "drone noise" useita julkaisuja, jotka käsittelevät äänen mittaamista drooneilla. Useimmat julkaisut koskevat äänilähteen suunnan määrittämistä droonilla [10, 11] tai droonin aiheuttaman herätteen vaimentamista eri algoritmeilla [12, 13, 14]. Suoranaisesti melumittauksia koskevia julkaisuja ei löydy. VTT:n raportin mukaan melumittaus onnistuu droonilla tietyin ehdoin [15]. Drooni aiheuttaa droonin sijoitettuun mikrofoniin merkittävän herätteen, joka on droonista, taajuudesta ja mikrofoniin sijaituksesta riippuen noin 40 – 70 dB [14, 15, 16, 17]. Heräte syntyy pääosin droonin moottoreista, droonin mekaanisesta värähtelystä sekä propelleista [16, 17, 18]. Moottorien heräte alkaa voimistua moottoreista riippuen noin 2 kHz kohdalla. Propellien heräte on dominoiva ja sitä karakterisoi propellien lapataajuus ja niiden harmoniset monikerrat [14, 15, 16, 17, 18]. Lapataajuus voidaan laskea propellin pyörimistaajuuden sekä propellin lapojen määrän tulona. Lapataajuus on drooneilla

usein suuruusluokkaa 50 - 200 Hz. Lapataajuuden harmoniset monikerrat ovat merkittäviä noin kymmenenteen harmoniseen komponenttiin asti [15, 16, 18]. Mikrofonin paras sijoituspaikka on droonin vierellä, propellien tasolla, mahdollisimman kaukana droonista. Propellien aiheuttamaa herätettä on vaikea vaimentaa mekaanisella esteellä mikrofonin ja propellien välissä, sillä propellien matalataajuuksinen ääni diffraktoituu esteen reunoilta. Este lisää merkittävää painoa sekä tuulikuormaa drooniin, lisäksi kevytrakenteinen este on huono vaimentamaan matalataajuuksisia ääniä. Viitatuista tutkimuksista voidaan päätellä, että melumittaaminen droonilla on mahdollista. Mitattavan melulähteen tulee olla tarpeeksi voimakas, jotta droonin heräte ei peitä melulähteen herätettä.

Korkea piippu on hyvä esimerkki ihanteellisesta melumittauskohteesta droonille. Mittalaitteiden asettaminen korkeaan piippuun on perinteisin keinoin työlästä, sillä se vaatii henkilön kiipeämistä piipun huipulle. Tämä vie kauan aikaa sillä piippuun pitää lähes poikkeuksetta kiivetä rappusia tai tikkaita pitkin. Piippuun pitää mennessään myös kantaa kaikki mittalaitteisto, mukaan lukien jonkinlainen teline, jolla mikrofoni saadaan asetettua haluttuun mittapisteeseen. Mikrofonin asettelu voi kestää kauan, etenkin jos mittauksia tehdään useista eri mittapisteistä. Vaihtoehto piippuun kiipeämiselle on mittalaitteiston sijoitus mittapisteeseen nosturilla. Nosturin vuokraaminen on kallista, etenkin jos piippu on korkea. Korkeammalle yltävät nosturit ovat kalliimpia vuokrata kuin matalalle yltävät. Mittaaminen nosturin avulla tulee käytännössä mahdottomaksi, jos mitattava piippu on niin korkea, että mikään saatavilla oleva nosturi ei sinne yllä. Mittalaitteen vieminen mittapisteeseen droonilla on sitä vastoin todella helppoa. Drooni ja mittalaitteisto valmistellaan mittaukseen maassa, tämän jälkeen droonilla noustaann mittapisteeseen. Nousu droonilla kestää vain joitain kymmeniä sekunteja, vertailuksi henkilön kiipeämisessä korkeaan piippuun kestää kymmeniä minuutteja. Arvioin että, piippumelun mittaaminen korkeasta piipusta on jopa 20 kertaa nopeampaa droonilla kuin muilla keinoin. Dronilla mikrofoni voidaan sijoittaa helposti lähes mihin vain, myös henkilöille vaarallisille alueille, kuten kemikaalihöyryjen ja mekaanisten laitteiden lähelle.

Piippumelun mittauksessa sovelletaan DIN 45 635-47-KL 3 -standardia, jossa määritetään esimerkiksi mittauksessa käytettävän laitteiston vaatimukset sekä mittapisteet. Kyseinen standardi on vuodelta 1985, ajalta jolloin nykyisen kaltaisia käytännöllisiä, neli- tai kuusipropellisia drooneja oli vain tieteiselokuvissa. Tämän takia standardi ei ole droonimittausnäkökulmasta melumittaajan eduksi, vaan standardin noudattaminen droonimittauksessa luo haasteita. Uskon että, uusia standardeja syntyy esimerkiksi piippumelun mittausta koskien, kun on pystytty osoittamaan, että drooniin kiinnitetyllä

äänentasomittarilla kyetään mittaamaan melua luotettavasti. Mittausolosuhteet drooneilla tulevat tulevaisuudessa paranemaan, kun droonien propelli- ja moottoriteknologia kehittyy, jolloin niiden aiheuttama heräte pienenee.

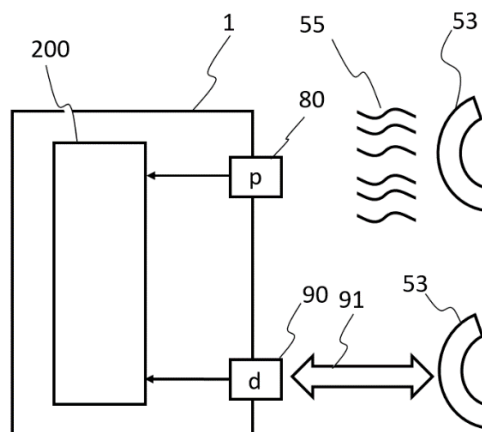
Melumittaukseen droonilla liittyy ilmiselvä ongelma, droonin itsensä aiheuttama heräte äänitasomittariin. Dronin heräte peittää melulähteen herätteen, jolloin marginaali jää pieneksi. Marginaalilla tarkoitetaan melulähteen ja taustamelun, eli tässä tapauksessa droonin aiheuttamien herätteiden eroa. Marginaali  $M$  [dB] voidaan laskea kaavalla:

$$M = L_S - L_B, \quad (8)$$

jossa  $L_S$  on melulähteen melu [dB] ja  $L_B$  on taustamelu [dB]. Melumittauksia koskevan ISO 3744:2010 -standardin mukaan marginaalin tulee olla vähintään 6 dB [19]. Ongelma voidaan ratkaista sijoittamalla drooni äänitasomittareineen melulähteen lähelle, jossa melulähteen melu on voimakkaimmillaan. Marginaali pysyy näin riittävänä, mutta ratkaisusta johtuu toinen ongelma. Pallomainen äänenpainerintama vaimenee etäisyyteen nähden kääntäen verrannollisesti, puolittuen etäisyyden kaksinkertaistuessa. Tästä johtuen, mitä lähempänä melulähdettä ollaan, sitä pienempi muutos äänitasomittarin sijainnissa aiheuttaa samansuuruisen virheen mittauksissa. Esimerkiksi jos äänitasomittari sijoitetaan 1 m:n etäisyydelle melulähteestä äänitasomittarin liikkeessä 10 cm taaksepäin, äänenpainetaso vaimenee noin 0,83 dB:n verran. Kun taas vastaavasti 5 m etäisyydellä vaimeneminen on noin 0,17 dB. Drooni liikkuu tuulen ja muiden voimien takia hallitsemattomasti. Mittaustulokseen tulee näin ollen epävarmuutta, kun drooni liikkuu. Melumittauksia koskevissa standardeissa määritellään aina mittausta koskeva epävarmuus, esimerkiksi DIN 45 635-47-KL 3 -standardissa epävarmuudeksi sallitaan maksimissaan  $\pm 4$  dB [20]. Opinnäytetyötä tehtäessä keksittiin menetelmä ja laite, jolla kappaleessa esitetyt ongelmat ratkaistaan. Ongelma ratkaistaan mittaamalla droonin sijaintia suhteessa melulähteeseen synkronisesti melumittauksen kanssa, jolloin melumittauksen tulosta voidaan kompensoida joka ajanhetkellä kyseisen ajanhetken etäisyydellä. Näin ollen droonin liike ei aiheuta epävarmuutta melumittaukselle, kun droonin liike otetaan huomioon melumittaustulosta laskiessa joka ajanhetkeltä erikseen, yhden arvon sijaan.

Perinteisillä menetelmillä mikrofoni asetellaan siten, että se pysyy koko mittaustapahtuman ajan paikallaan. Droonimittauksissa etäisyys mitataan drooniin sijoitetulla etäisyysanturilla. Lisäksi koska drooni liikkuu kolmiulotteisessa avaruudessa, voidaan droonin liikettä mitata sivuttais- ja pystyakseleilla inertia-anturilla (engl. IMU, inertial measurement unit). Tällöin droonin sijainti melulähteeseen voidaan selvittää kolmiulotteisessa

avaruudessa. Melumittaustapahtuma voi olla joko passiivinen tai aktiivisesti kompensoitu. Sekä passiivisessa että aktiivisesti kompensoidussa melumittaustapahtumassa sekä etäisyyttä että droonin liikettä mitataan synkronisesti melumittauksen kanssa koko mittaustapahtuman ajan. Passiivisessa mittauksessa mittaustapahtuman alussa suoritettavasta etäisyysmittauksesta lasketaan rajat etäisyys-, sivuttais- ja pystyakseleille, näistä rajoista muodostuu virtuaalinen tilavuus, jonka sisällä oltaessa melumittauksen epävarmuus on sallittua epävarmuutta pienempi. Tilavuuden suuruus määräytyy etäisyydestä sekä halutusta epävarmuudesta. Mitä suurempi epävarmuus ja/tai etäisyys, sen suurempi tilavuus. Jos drooni liikkuu tilavuuden ulkopuolelle, tulee mittaus päättyä. Passiivinen mittaus voi toimia myös siten, että melua mitataan aina droonin ollessa määritetyn tilavuuden sisällä. Tällöin drooni voi väliaikaisesti poistua sallitun tilavuuden sisältä, mutta mittaus jatkuu, kun sinne palataan. Aktiivisesti kompensoidussa mittaustapahtumassa melumittauksen tulosta kompensoidaan joka ajanhetkenä kyseisen ajanhetken etäisyydellä, jolloin drooni saa liikkua vapaammin melulähteen ympärillä. Tällöin myös epävarmuus pienenee. Kompensointi voidaan suorittaa joko mittauksen aikana tai sen jälkeen. Tässä kappaleessa kuvatulle menetelmälle ja laitteelle haetaan patenttia. Etäisyysmittauksen toteutuksesta kerrotaan tarkemmin luvussa 4. Inertiamittaus ei ole osa tämän opinnäytetyön aihepiiriä.



Kuva 4. Yksinkertaistettu kuva patenttihakemuksesta.

### 3 ÄÄNITASOMITTARI

#### 3.1 Toiminta ja rakenne

Äänitasomittari on tarkka mittalaite, jolla mitataan nimensä mukaisesti äänitasoja. Puhekielessä kuulee usein termin "desibelimittari", äänitasomittari ei kuitenkaan ole desibelimittari. Äänitasomittari koostuu mikrofoniasta, esivahvistimesta, signaalinkäsittelyjärjestelmästä, tallennustilasta, sekä käyttöliittymästä. Äänitasomittari mittaa äänenpainetta  $p$  [Pa], josta se laskee kaavalla (4) äänenpainetason  $L_p$  [dB]. Äänenpainetaso voi olla joko taajuuspainotettu  $L_{Ap}$  [dB] tai taajuuspainottamaton  $L_p$ . Kuvassa 5 on tyypillinen äänitasomittari. Äänitasomittarin yläpäässä oleva metallinen osa on esivahvistin, jonka päässä näkyy saumalla erottuva mikrofoni.



Kuva 5. Norsonic Nor140 -äänitasomittari, Nor1209 -esivahvistimella ja Nor1225 -mikrofonilla.

Äänitasomittarit kykenevät usein myös taajuusanalyysiin muuttamalla mitatun äänen aikatasosta taajuustasoon FFT:llä. FFT jakaa äänen taajuuskoreihin, jolloin äänen sisältämiä eri taajuuskomponentteja voidaan analysoida. Nykyaikaiset äänitasomittarit ovat integroivia, jolloin ne pystyvät mittaamaan ekvivalentin äänitason  $L_{eqT}$ . Myös tässä opinäytetyössä toteutettavasta mittarista tulee integroiva.

Äänitasomittari tulee aina kalibroida ennen melumittausta, siinä kokoonpanossa ja niissä olosuhteissa, joissa mittaukset tullaan tekemään. Kalibrointiin käytetään äänitasokalibraattoria. Kalibraattori kytketään mikrofoniin muovisella mikrofonyyppikohtaisella adapterilla, joka on suunniteltu siten, että kalibraattori tuottaa kyseiselle mikrofonille tarkalleen tiedetyn äänenpaineen. Kalibraattorin tuottama äänitaso on usein käyttäjävalinnan mukaan 94 dB tai 114 dB ja taajuus 250 Hz tai 1 kHz. 94 dB vastaa noin 1 Pa äänenpainetta, ja 114 dB vastaa noin 10 Pa äänenpainetta.



Kuva 6. Norsonic Nor1256 -äänitasokalibraattori, kalibraattorin suojakotelo ja Nor4583- sekä GRAS RA0341- mikrofoniaadapterit.

IEC 61672-1:2013 “Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications”-standardi määrittää vaatimukset äänitasomittareille. Äänitasomittarin tulee olla standardin mukainen, jotta sitä voidaan käyttää virallisiin melumittauksiin. Standardi jakaa äänitasomittarit luokan 1 ja 2 laitteisiin, joista luokan 1 äänitasomittareiden tulee täyttää tiukemmat vaatimukset. Luokan 2 äänitasomittari voi täyttää joitain luokan 1 vaatimuksia, mutta jos jokin ominaisuus täyttää vain luokan 2 vaatimuksen, äänitasomittari kuuluu luokkaan 2. Äänitasomittarin luokitus riippuu myös äänitasomittarin kokoonpanosta, esimerkiksi tietyllä mikrofonilla äänitasomittarin luokitus voi kuulua luokkaan 2 kun taas toisella mikrofonilla luokkaan 1 [1].

Droonin avulla tehtäviin melumittauksiin ei ole saatavilla kaupallisia äänitasomittareita, eikä Internet-hauilla löydy aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Opinnäytetyössä tehtävä äänitasomittari on täten todennäköisesti yksi ensimmäisistä, ellei ensimmäinen käyttötarkoitukseen tehty äänitasomittari. Äänitasomittari tulee sisältämään USB-rajoituksen, jolla se kommunikoi mittalaitteen kanssa ja josta se saa myös käyttöjännitteensä. Äänitasomittarin käyttöliittymänä ja näyttönä toimii internetiselaimella käytettävä pilvipalvelu, Aeromon Cloud Service (ACS). Käyttöliittymästä valitaan äänitasomittarin asetukset, käynnistetään mittaus sekä tarkastellaan mittaustuloksia. Tieto välittyy moduulin ja mittalaitteen välillä USB-väylän läpi, ja mittalaitteen ja pilven välillä langattoman Internet-yhteyden avulla. Mikrofonin liitännäksi tulee BNC-liitin.

### 3.2 Mikrofonit

Äänitasomittari mittaa ääntä siihen kiinnitetyllä äänenpaineanturilla eli mikrofonilla. Mikrofoneja on useisiin eri tekniikoihin perustuvia, joista melumittauskäytössä yleisimpiä ovat kondensaattorimikrofonit. Kondensaattorimikrofoni on nimensä mukaisesti kondensaattori, jossa toinen levy on jäykkä metallilevy ja toinen ohut, usein kullalla päällystetty muovinen kalvo. Kalvo värähtelee äänenpaineen mukana, jolloin levyn ja kalvon välinen etäisyys  $d$  muuttuu, jonka takia mikrofonin kapasitanssi muuttuu. Kondensaattorin kapasitanssi  $C$  [F] voidaan laskea kaavalla:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, \quad (9)$$

jossa  $\epsilon$  väliaineen permeabiliteetti [F/m],  $A$  on levyjen pinta-ala [m<sup>2</sup>] ja  $d$  on levyjen välinen etäisyys [m]. Kondensaattorin väliin jäävä jännite  $U$  voidaan laskea kaavalla:

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (10)$$

jossa  $Q$  on kondensaattorin varaus [C]. Kondensaattorimikrofonin tuottama jännite on kohtuullisen suuri, mutta virta on hyvin pieni, joten mikrofonin signaalia vahvistetaan esivahvistimella. Kondensaattorimikrofonit tarvitsevat toimiakseen 200 V polarisointijännitteen, joka ylläpitää varausta kalvon ja levyn välissä. On myös esipolarisoituja kondensaattorimikrofoneja, joissa kalvon ja levyn välinen varaus syntyy materiaalien ominaisuuksista. Esipolarisoidut mikrofonit tarvitsevat IEPE-tekniikkaan perustuvan esivahvistimen, joka tarvitsee puolestaan biasjännitteen ja -virran. Melumittaamiseen tarkoitettut mikrofonit usein ruuvaantuvat suoraan mikrofonille tarkoitettuun esivahvistimeen kiinni. Mikrofonit ja esivahvistin ovat näin ollen käytännössä hyvin toisiinsa integroituvia laitteita.



Kuva 7. Esipolarisoitu GRAS 146AE 1/2" CCP vapaakenttämikrofoni, BNC-liittimellä.

Opinnäytetyön äänitasomittarin kanssa käytettäväksi mikrofoniksi on määrätty GRAS 146AE 1/2" CCP -vapaakenttämikrofoni. 146AE on IEPE-tekniikalla toimiva esipolarisoitu mikrofoni, jossa on integroitu esivahvistin. Mikrofonit on IEC 61672-1:2013 -standardin luokan 1 mikrofoni ja sen nominaalinen vaste on 50 mV/Pa [21].



## 4 ETÄISYYSMITTAUS

Koska äänenpainerintama vaimenee etäisyyden funktiona, on kriittistä tietää tarkka etäisyys melulähteeseen. Etäisyydestä voidaan laskea äänenpainetaso etäisyydellä  $r_x$ , kun mittaus on tehty etäisyydellä  $r_0$ . Tällöin eri ja/tai samaa melulähteitä voidaan mitata eri etäisyyksillä, ja mittaustulokset voidaan korjata vastaamaan lukemaa samalle etäisyydelle  $r_x$ . Täten mitattuja äänenpainetasoja voidaan verrata keskenään, vaikka mitaukset olisi tehty eri etäisyyksiltä. Äänenpainetaso  $L_{px}$  etäisyyden  $r_x$  päässä melulähteestä voidaan laskea kaavalla:

$$L_{px} = L_{pc} + 20 \log_{10} \left( \frac{r_c}{r_x} \right), \quad (11)$$

jossa  $r_c$  on etäisyys, jossa äänenpainetaso  $L_{pc}$  on mitattu. Vastaavasti äänenpaine  $p_x$  etäisyyden  $r_x$  päässä melulähteestä voidaan laskea kaavalla:

$$p_x = p_c \frac{r_c}{r_x}, \quad (12)$$

jossa  $r_c$  on etäisyys, jossa äänenpaine  $p_c$  on mitattu. Normaalissa melumittauksessa  $r_c$  voidaan mitata esimerkiksi mittanauhalla tai laseretäisyysmittarilla. Drooni melumittauksissa etäisyys  $r_c$  mitataan drooniin kiinnitetyllä etäisyysanturilla.

### 4.1 Etäisyysmittauksen epävarmuuden vaikutus melumittauksen tulokseen

Melumittauksen tuloksen  $L_{pc}$  epävarmuus  $L_{\Delta t}$  on riippuvainen etäisyysmittauksen tuloksen  $r_c$  epävarmuudesta  $r_{\Delta}$ .  $r_{\Delta}$ :n suuruus riippuu etäisyysanturin suorituskyvystä, sekä käytetyistä signaalinkäsittelyn algoritmeista. Käyttötarkoitukseen sopivien antureiden epävarmuus on suurusluokaltaan senttimetrejä.  $r_{\Delta}$ :n yksikkö on  $\pm m$ .  $r_{\Delta}$ :sta johtuva epävarmuus  $L_{\Delta r}$   $L_{pc}$ :hen voidaan laskea kaavalla:

$$L_{\Delta r} = L_{p1} - L_{p2}, \quad (13)$$

jossa  $L_{p1}$  ja  $L_{p2}$  voidaan laskea kaavaa (11) soveltamalla:

$$L_{p1} = L_{pc} + 20 \log_{10} \left( \frac{r_c}{r_c - r_{\Delta}} \right), \quad (14)$$

ja:

$$L_2 = L_{pc} + 20 \log_{10} \left( \frac{r_c}{r_c + r_{\Delta}} \right). \quad (15)$$

Täten  $L_{\Delta r}$ :n yksikkö on dB.  $L_{\Delta r}$  voidaan ilmoittaa myös äänenpaineena  $p_{\Delta r}$ :

$$p_{\Delta r} = p_1 - p_2, \quad (16)$$

jossa äänenpainetasoja  $L_{p1}$  ja  $L_{p2}$  vastaavat äänenpaineet  $p_1$  ja  $p_2$  voidaan laskea kaavaa (12) soveltamalla kaavoilla:

$$p_1 = p_c \frac{r_c}{r_c - r_{\Delta}}, \quad (17)$$

ja:

$$p_2 = p_c \frac{r_c}{r_c + r_{\Delta}}. \quad (18)$$

Kuten kappaleessa 2.2 on todettu, äänenpainetaso vaimenee etäisyyteen nähden kääntäen verrannollisesti, näin ollen etäisyyden pientyessä tapahtuva äänenpainetason voimistuminen on nopeampaa kuin etäisyyden kasvaessa tapahtuva vaimeneminen. Tästä voidaan johtaa:

$$L_{p1} - L_{pc} > L_{pc} - L_{p2}, \quad (19)$$

ja vastaavasti:

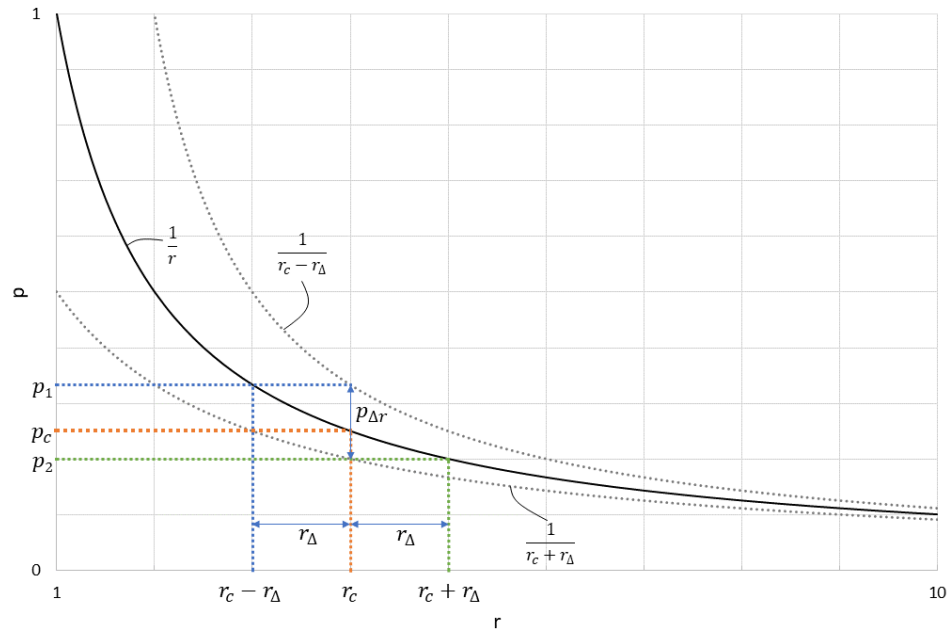
$$p_1 - p_c > p_c - p_2. \quad (20)$$

Tämän takia  $L_{\Delta r}$ :n aiheuttama epävarmuus  $L_{pc}$ :hen ei ole symmetrinen  $L_{pc}$ :n ympärillä, vaan  $L_{\Delta r}$ :n derivaatta on suurempi  $r_c$ :tä pienemmillä etäisyyksillä kuin  $r_c$ :tä suuremmilla etäisyyksillä. Samasta syystä  $L_{\Delta r}$  suurenee kun  $r_c$  lähestyy melulähdettä. Tätten epätarkalla etäisyysmittauksella melua voidaan mitata vain kaukana melulähteestä, sillä lähellä melulähdettä  $L_{\Delta r}$  kasvaa hyvin suureksi. Esimerkiksi  $r_{\Delta}$ :n ollessa 10 cm ja  $r_c$ :n ollessa 1 m, on  $L_{\Delta r} = 1,74$  dB, kun taas  $r_{\Delta}$ :n ollessa 10 cm ja  $r_c$ :n ollessa 5 m, on  $L_{\Delta r} = 0,35$  dB.

Myös melumittauksen epävarmuus  $L_{\Delta}$  vaikuttaa mittaustuloksen  $L_{pc}$  epävarmuuteen.  $L_{\Delta}$  riippuu äänitasomittarin suorituskyvystä. IEC 61672-1:2013 -standardin luokan 1 täyttävän mittarin epävarmuus tulee olla taajuudesta riippuen noin  $\pm 1,0$  dB [1],  $L_{\Delta}$ :n yksikkö on  $\pm$ dB. Järjestelmän kokonaisepävarmuus  $L_{\Delta t}$  voidaan laskea kaavalla:

$$L_{\Delta t} = L_{\Delta} + \frac{L_{\Delta r}}{2}, \quad (21)$$

jolloin  $L_{\Delta t}$ :n yksikkö on  $\pm$ dB. Kuvassa 8, käyrä  $\frac{1}{r}$  kuvaa äänenpainetta  $p_c$  kaikilla  $r$ :n arvoilla.  $\frac{1}{r_c - r_{\Delta}}$  ja  $\frac{1}{r_c + r_{\Delta}}$  kuvaavat äänenpainetta  $p_1$  ja  $p_2$  kaikilla  $r$ :n arvoilla. Käyrien  $\frac{1}{r_c - r_{\Delta}}$  ja  $\frac{1}{r_c + r_{\Delta}}$  väliin jää  $p_{\Delta r}$ , joka suurenee  $r$ :n pienentyessä. Vastaavan kuvan voisi esittää myös äänenpainetasoina.



Kuva 8. Etäisyysmittauksen epävarmuuden vaikutus melumittauksen epävarmuuteen.

Melumittauksia koskeissa standardeissa on usein määritelty mittauksessa sallittu epävarmuus  $L_{\Delta s}$ . Esimerkiksi DIN 45 635-47-KL 3 -standardissa epävarmuudeksi sallitaan maksimissaan  $\pm 4$  dB [20]. Luonnollisesti mittauksissa pyritään mahdollisimman pieneen epävarmuuteen. Jos esimerkiksi  $L_{\Delta s} = \pm 1,5$  dB,  $r_{\Delta} = 0,1$  m ja  $r_c = 2,0$  m, niin tällöin mikrofoni saa liikkua välillä 1,77 – 2,26 m, jolloin äänenpainetaso  $L_p$  on noussut tai laskenut 1,5 dB. Tätä  $r$  väliä kutsutaan sallituksi etäisyysikkunaksi  $r_{a\Delta}$ , joka voidaan laskea kaavalla:

$$r_{a\Delta} = r_{\max} - r_{\min}, \quad (22)$$

jossa  $r_{\min}$  on lähin, ja  $r_{\max}$  kaukaisin etäisyys joilla pysytään sallituissa rajoissa.  $r_{\min}$  ja  $r_{\max}$  voidaan laskea kaavoilla:

$$r_{min} = (r_c + r_{\Delta})10^{\frac{-L_{\Delta s}}{20}}, \quad (23)$$

ja

$$r_{max} = (r_c - r_{\Delta})10^{\frac{-L_{\Delta s}}{20}}. \quad (24)$$

Etäisyyksien välissä pätee  $L_{\Delta r} < L_{\Delta s}$ . Pienemmällä  $r_{\Delta}$ :lla saavutetaan suurempi  $r_{\Delta}$ .

#### 4.2 Vertailua

Etäisyysanturin mittausalueeksi on määrätty noin 1 – 10 m, melumittaukset tulevat sijoittumaan noin 1 – 5 m etäisyyksille. Markkinoilla on saatavilla useisiin eri tekniikoihin perustuvia etäisyysantureita, jotka toimivat halutulla mittausalueella. Tekniikasta riippumatta lähes kaikki anturit toimivat samalla periaatteella, anturi lähettää mitattavaan kohteeseen pulssin, joka heijastuu kohteesta takaisin anturiin. Merkittävä poikkeus on stereokamera, joka ei lähetä lainkaan signaalia. Stereokameroissa käytetään monimutkaisia algoritmeja, joilla kameroiden eri perspektiiveistä olevista kuvista saadaan selvitettyä syvyystieto. Anturin lähettämän pulssin lentoajasta saadaan laskettua etäisyys kohteeseen kaavalla:

$$r = \frac{tc}{2}, \quad (25)$$

jossa  $r$  on etäisyys kohteeseen [m],  $t$  on pulssin lentoaika [s] ja  $c$  on pulssin etenemisnopeus [m/s].  $t$ :n ja  $c$ :n tulo jaetaan kahdella, sillä pulssi kulkee mitattavan matkan edes takaisin.

Etäisyysanturit voidaan jakaa kolmeen ryhmään, niiden mittaamien ulottuvuuksien määrän mukaan. Sensoriryhmiä voidaan verrata pallokoordinaatistoa hyödyntäen. Yksiulotteisella etäisyysanturilla saadaan selville tieto vain syvyyssulottuvuudesta  $r$ . Tällaisia antureita voivat olla esimerkiksi ultraääni-, mikroaalto-, infrapuna- ja laseranturit. Kaksiulotteinen etäisyysanturi mittaa syvyyssiedon monessa eri  $\varphi$ -kulmassa. Useissa eri  $\varphi$ -kulmissa tehdyistä syvyysmittauksista voidaan koostaa kaksiulotteinen taso. Mittauksen kierto  $\varphi$ -kulmassa tehdään usein pyörivällä peilillä. Tällaisia antureita voivat olla esimerkiksi laseranturit. Kolmiulotteinen etäisyysanturi mittaa syvyyden  $\varphi$ -kulman lisäksi myös useassa eri  $\theta$ -kulmassa. Kun syvyys tiedetään eri  $\varphi$ - ja  $\theta$ -kulmissa, voidaan syvyysmittauksista koostaa kolmiulotteinen avaruus. Tällaisia antureita ovat esimerkiksi stereo- ja

ToF-kamerat (engl. time-of-flight camera) sekä valotutkat (engl. LIDAR, Light Detection and Ranging).

Taulukko 1. Etäisyysanturitekniikoiden vertailu.

<b>Tekniikka</b>	<b>Pulssin tyyppi</b>	<b>Tyypillinen kantama [m]</b>	<b>Ulottuvuuksia</b>	<b>Tyypillinen paino</b>	<b>Tyypillinen hinta</b>
<b>Infrapuna</b>	Infrapunasäteily	0,01 – 2	1 – 2	kevyt	halpa
<b>Laser</b>	Valo	0,1 – 30000	1 – 2	kevyt	halpa
<b>Valotutka</b>	Infrapunasäteily	1 – 100	2 – 3	painava	kallis
<b>Mikroaalto</b>	Mikroaallot	1 – 50	1	kevyt	halpa
<b>Stereokamera</b>	Valo	0,5 – 50	3	keskipainava	keskihalpa
<b>ToF-kamera</b>	Valo	0,1 – 10	3	keskipainava	keskihalpa
<b>Ultraääni</b>	Ultraääni	0,1 – 20	1	keskipainava	halpa

Infrapuna-antureilla on liian lyhyt kantama, ja lisäksi auringosta tuleva infrapunasäteily voi häiritä sensoria. Näin ollen se ei sovellu käyttötarkoitukseen. Laseranturien keila on usein hyvin kapea. Tämä on ongelma droonimittauksissa, sillä anturi heiluu huomattavasti, jolloin anturi ei aina osoita suoraan mitattavaan kohteeseen. Lisäksi esimerkiksi savupiipun huipulla olevat rakenteet, kuten piippua kiertävä kaide, voi häiritä mittausta. Valotutkat ovat huomattavan kalliita sekä painavia. Paino on kriittinen ominaisuus droonimittauksissa. Mikroaaltotutkat vaikuttavat paperilla hyviltä, mutta eivät ole kovinkaan yleisiä, ja saatavuus ei ole kovinkaan hyvä. Stereokamera vaatii monimutkaisen ohjelmiston toimiakseen. Ultraäänitekniikalla toimiva anturi soveltuu käyttötarkoitukseen parhaiten. ToF-kameran toiminta voi olla ulkotiloissa epävarmaa, auringon infrapunasäteilyn takia. Ultraäänianturien ongelmana on kohtuullinen paino, sekä pulssien mahdollinen häirintä melumittaukselle.

Etäisyysanturiksi päädyttiin kuitenkin valitsemaan ultraäänianturi, sillä on saatavilla ultraääniantureita, joilla pystytään mittaamaan useita etäisyyksiä yhdellä mittauksella. Tämän avulla esimerkiksi piippua kiertävä kaide ei koidu ongelmaksi. Vastaavasti piipun yläreunan yllä mitatessa piipun sisä- ja ulkopinnat eivät sekoita mittausta. Lisäksi piipusta tulevat mahdolliset höyryt eivät häiritse mittausta. Ultraäänianturit toimivat ultraäänipulsseilla, jotka ovat taajuudeltaan tyypillisesti noin 40 – 70 kHz. Pienempi taajuisilla antureilla on tyypillisesti suuri kantama, parhaimmillaan noin 10 m asti. Suurtaajuisilla antureilla on taas huonompi kantama, sillä ääni vaimenee ilmassa verrannollisesti taajuuteen. 300 kHz:n taajuudella toimivan anturin kantamaksi voi odottaa alle 1 m.

Suurempi taajuisilla antureilla voidaan saada parempi tarkkuus, koska kantoaallon jaksonaika on lyhyempi. 300 kHz:n anturilla voidaan päästä jopa yhden 1 mm:n tarkkuuteen, kun taas 40 kHz:n taajuudella toimivalta anturilta voi odottaa noin 1 cm:n tarkkuutta. Tässä sovelluksessa 1 cm:n tarkkuus on riittävä ja kantama noin 10 m:iin asti on tärkeämpi ominaisuus, kuin millimetrialueella liikkuva tarkkuus. Ultraääniantureilla on usein noin 10° leveä keila "kaukana" anturista, lähellä anturia keila on leveämpi. Keila kapenee etäisyyden kasvaessa, koska äänienergia on tiheintä keilan keskikohdalla. Täten keilan reunat vaimenevat nopeammin tasolle, joka ei riitä heijastumaan takaisin anturiin.

### 4.3 Valinta

Eri ultraäänianturi vaihtoehtoja vertailtiin. Vertailun päätteeksi valittiin MaxBotix'in valmistaman XL-MaxSonar-WRLA1 -sarjan MB7076 ultraäänianturin. Anturi toimii 42 kHz taajuudella. Anturin näytteenottotaajuus  $f_{mb}$  on maksimissaan 10 Hz, kantama on maksimissaan 10 m, keila on "kapea" ja anturilla on IP67-luokitus [22]. Yksi tärkeimmistä syistä kyseisen anturin valintaan oli sen "analog envelope" ominaisuus, joka on anturin akustisen signaalin ulostulo aika-jännite signaalina. Anturi palauttaa koko heijastuvan signaalin yhden mittausarvon sijaan, tämä mahdollistaa etäisyyden mittaamisen useaan eri kohteeseen usealla eri etäisyydellä yhdellä mittauksella.



Kuva 9. MaxBotix MB7076 XL-MaxSonar-WRLA1 -etäisyysanturi (kuva MaxBotix Inc.) [23].

### 4.4 Ensitestaus

MB7076-etäisyysanturin suorituskyvyn ja toiminnan testaamista varten tehtiin yksinkertainen testijärjestelmä. Anturi kytkettiin Adafruit Trinket M0 -kehityskorttiin. Ensitesteissä Trinketiin ohjelmoitiin C++ -ohjelmia Microsoftin Visual Studio Code tekstieditoria ja sen Arduino laajennusta käyttäen. Visual Studio Code valikoitui tekstieditoriksi aiempien

käyttökokemuksien perusteella todetun hyvän toiminnallisuuden perusteella. Arduino-ohjelmointiympäristöä käytettiin, sillä se mahdollistaa todella nopean ja yksinkertaisen tavan kirjoittaa ohjelmia.

Taulukko 2. MB7076-pinnien funktiot ja kytkennät Trinketiin.

MB7076:n pinnin nimi	Kuvaus	Kytkeyty Trinketin pinniin
<b>Pin 1</b>	Avoimena tai ylhäällä kytkee sarja ulostulon pinniin 5. Alhaalla mahdollistaa sensoreiden ketjutuksen.	
<b>Pin 2</b>	Akustisen signaalin analogin ulostulo, eli analoginen aika-jännite signaali.	1
<b>Pin 3-AN</b>	Analoginen ulostulo.	
<b>Pin 4</b>	Avoimena tai ylhäällä sensori mittaa toistuvasti. Alhaalla mitaus loppuu. $> 20 \mu\text{S}$ pulssilla liipaistaan yksi mitaus.	0
<b>Pin 5</b>	RS232 sarja ulostulo, kun pinni 1 on avoimena tai ylhäällä. Lähettää yksittäisen pulssin ketjutukseen, kun pinni 1 on alhaalla.	
<b>V+</b>	Käyttöjännite 3 – 5,5 V	USB (5V)
<b>GND</b>	Maa	gnd

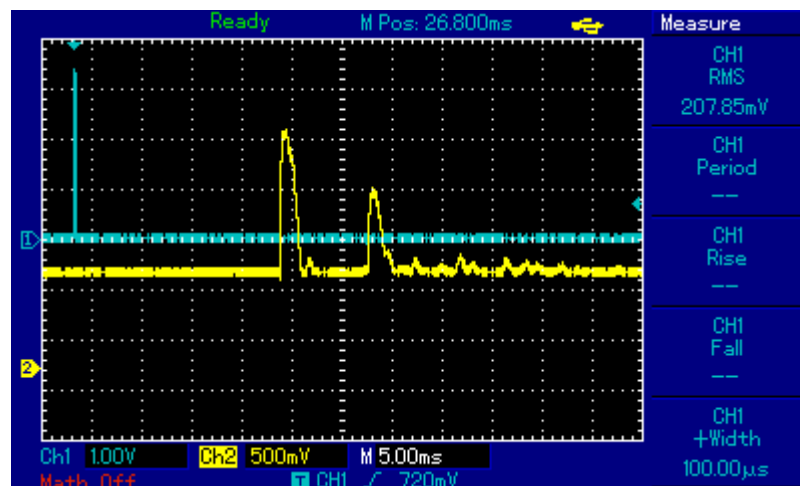
Anturin Pin 2 kytkettiin UNI-T UTD2025CL -oskilloskoopin kanavaan 1. Analogisessa ulostulossa on jatkuva noin 1,54 V:n tasajännite. Anturin Pin 4 kytkettiin samaisen oskilloskoopin kanavaan 2. Sensori asetoitiin telineeseen noin 1 m:n korkeudelle pöydän pinnasta, osoittamaan suoraan maalattuun betoniseinään, johon mitattiin datalehden määrittämästä kohdasta mittanauhalla etäisyydeksi 2,40 m.

Aluksi testattiin anturin liipaisua. Koska etäisyyden- ja äänenmittauksien tulee olla synkronista, etäisyysmittauksen liipaisun tulee olla kontrolloitua. Datalehdessä kerrotaan, että anturi voidaan liipaista kontrolloidusti siten, että anturin Pin 4 pidetään alhaalla ja kirjoitetaan ylös  $> 20 \mu\text{s}$  ajaksi.

Liipaisua pulssilla testattiin kirjoittamalla ohjelma, joka kirjoittaa toistuvasti Trinketin pinnin 0 ylös 100 ms:n välein  $100 \mu\text{s}$ :n ajaksi.  $t_t$  on absoluuttinen mikrokontrollerin käynnissäoloaika hetkeltä, jolloin liipaisupulssi lähetetään.  $t_t$  on yhden mittauksen alkuaika, yksi mitaus tarkoittaa yhden liipaisun suorittamista ja tästä seuraavan analogisen aika-jännite signaalin lukemista. Liipaisua testattiin ja se toimi odotetusti. Analoginen signaali

nousee noin 20,65 ms  $t_t$ :n jälkeen. Signaali nousee 1,54 V:n jännitteestä 3,66 V jännitteeseen noin 160  $\mu$ s aikana. Signaalin referenssitaso  $U_0$ :ksi asetetaan 1,54 V, jolloin DC-jännitekomponentti saadaan pois mittatuloksista, eroa  $U_0$ :aan viitataan  $U_{\Delta}$ :na. Pulslien leveys  $t_w$  määritellään aikana, jonka pulssin amplitudi on yli  $U_0$ :n. Signaalin ensimmäinen pulssi on hyvin leveä ja sen  $t_w$  on 1,8 ms. Tämän ensimmäisen pulssin nousevaan reunaan viitataan  $t_0$ :na, seuraavien pulssien nousevien reunojen viivettä  $t_0$ :aan viitataan  $t_{\Delta}$ :na. Pulssit nimetään logiikalla  $P_{M,N}$ , jossa M on mittauksen yksilöivä kokonaisluku, ja N on mittauksen M pulssit yksilöivä kokonaisluku. Ensimmäinen pulssi, eli niin sanottu lähetyspulssi on täten aina  $P_{M,0}$  ja sen nousevasta reunasta saadaan aika  $t_0$ , jota käytetään referenssinä  $t_{\Delta}$ :n laskemisessa.  $t_0$ :n aikaan 5V linjassa tapahtuu noin 1 ms:n kestävä 60 mV:n RC-tyyppinen notkahdus.

2,40 m päässä olevasta seinästä heijastuu kaksi pulssia,  $P_{M,1}$  jonka  $t_{\Delta 1} = 14$  ms,  $t_{w1} = 1,6$  ms ja  $U_{\Delta 1} = 1,28$  V.  $P_{M,1}$ :tä seuraa välittömästi kiinni  $P_{M,2}$  jonka  $t_{\Delta 2} = 15$  ms,  $t_{w2} = 0,4$  ms ja  $U_{\Delta 2} = 0,60$  V. Huomattiin että pöytää heiluttamalla  $P_{M,2}$  muuttuu radikaalisti,  $P_{M,1}$  taas pysyi hyvin vakiona pöydän heiluttelusta huolimatta. Sijoittamalla  $t_{\Delta 1}$  ja äänen nopeus 343 m/s kaavaan (25) saadaan vastaukseksi 2,401 m, joka on mittanauhalla mitattu etäisyys noin 1 cm tarkkuudella. Määritetty analogisen signaalin referenssiaika  $t_0$  on siis oikea, ja etäisyys tulee laskea heijastuvien pulssien  $P_{M,N}$  nousevista reunoista, jotka sijaitsevat ajan  $t_{\Delta}$  päässä.



Kuva 10. Ruudunkaappaus oskilloskoopin näytöstä, jossa on nähtävissä liipaisupulssi kanavalla 1 ja anturin "analog envelope"- signaali kanavalla 2.



#### 4.5 Signaalinkäsittely

Anturin kantama on 10 m [22]. Kaavalla (3) voidaan laskea, että ääni kulkee 10 m matkan edes takaisin noin 58 ms ajassa. Kappaleessa 4.4 mainittu liipaisun jälkeinen viive on 20,65 ms, nämä summaamalla ja pyöristämällä saadaan näytteistysaika  $t_s = 80$  ms, joka on aika, kuinka kauan signaalia näytteistetään liipaisun jälkeen. Pulseja ei ole enää syytä odottaa, kun hetkestä  $t_t$  on kulunut  $t_s$  aikaa. Absoluuttinen loppuaika näytteistykselle  $t_e$  lasketaan kaavalla:

$$t_e = t_t + t_s. \quad (26)$$

Anturin signaalista ei ole tarvetta tallettaa yksittäisiä näytteitä, sen sijaan tallennetaan kohteita *target*. Kohteilla on useita ominaisuuksia kuten aika, leveys, amplitudi, pinta-ala ja etäisyys. Arduino-ohjelman kehitettiin, joka koostuu globaaleista muuttujista, setup- sekä loop-metodeista ja itsetehdystä MB7076\_WRLA1-luokasta. Liitteessä 1 on ohjelman pseudokoodi lohkokaavio.

##### 4.5.1 Setup- ja loop-metodit

Setup-metodissa alustetaan Serial-luokan sarjaliikenne ja MB7076\_WRLA1-luokan olio *Distance*.

Loop-metodissa liipaistaan etäisyysmittaus *trigger* metodilla, tämän jälkeen kohteita luetaan while-silmukassa *targetDetector*-metodilla, *target*-tietueista (engl. struct) koostuvaan taulukkoon *targets*. While-silmukka loppuu, kun aika saavuttaa  $t_e$ :n tai *targets* on tullut täyteen. *targets*in suuruus on teoreettisesti signaalin maksimi ilma-aika jaettuna lyhyin tunnistettava kohde. Käytännössä tämä kannattaa määrätä hiha-arvona, sillä todellisuudessa ei tule tilannetta, jossa kohteita olisi teoreettisen maksimi määrän verran, tai jos olisikin, niin oikean kohteen tunnistaminen olisi mahdotonta. While-silmukan päätyttyä, kohteet lajitellaan *targetProcessor*-metodilla pinta-alan mukaan relevanssi järjestykseen siten, että suurimman pinta-alan omaava pulssi on relevantein.

#### 4.5.2 Trigger- ja getDc-metodit

*Trigger*-metodi liipaisee MB7076-anturin asettamalla *trigger* pinnin ylös, metodille argumenttina annetun *pulse\_time* muuttujan ajaksi. *Pulse\_time* on määrätty olevan 100  $\mu$ s. Metodi palauttaa ajan  $t_e$ , joka annetaan *targetDetectorille* argumenttina. *TargetDetectorille* annetaan myös DC-tason alkuarvo, jonka *getDc* metodi palauttaa.

#### 4.5.3 TargetDetector-metodi

*TargetDetector* metodi näytteistää anturin signaalia while-silmukassa, kunnes aika saavuttaa  $t_e$ :n tai kriteerit täyttävä kohde havaitaan. Näytteitä lasketaan 256 tavun rengaspuskuriin, rengaspuskuri luetaan ja kirjoitetaan kahdella osoittimella, joiden nimet ovat *tail\_pointer* ja *lead\_pointer*. Osoittimet ovat 8 tavun kokonaislukuja, jolloin ne kippaavat automaattisesti arvosta 255 takaisin nollaan, tällä säästetään prosessointiaikaa sekä yksinkertaistetaan koodia. Uusi näyte tallennetaan aina rengaspuskuriin *lead\_pointterin* osoittamaan kohtaan, *lead\_pointterin* arvo kasvaa aina jokaisen näytteen jälkeen yhdellä.

*TargetDetectorin* while-silmukan alussa luetaan A/D-muuntimelta näyte, jonka arvoksi Trinket M0:lla tulee kokonaisluku väliltä 0-4095, sillä A/D-muunnin on 12-bittinen. Tämän jälkeen yksinkertainen algoritmi laskee DC-tasoa *dc\_level*, siirtäen *dc\_leveliä* aina uutta näytettä kohti yhden kokonaisluvun verran, joka 3,3 V käyttöjännitteellä ja 12-bittisellä A/D-muuntimella vastaa noin 0,8 mV. Seuraavaksi metodi poistaa A/D-muuntimen näytteestä *dc\_levelin*.

Metodissa on kaksi enum-muuttujalla ohjattua tilaa, *idle* ja *active*. *Idle*-tilassa metodi näytteistää signaalia niin nopeasti kuin se suinkin kykenee, näytteistystaajuutta ei siis ole määrätty. *Idle*-tilassa osoittimet ovat yhtä suuret ja jokainen while-silmukan kierros päättyy osoittimien kasvattamiseen yhdellä. *Idle*-tilassa ollaan, kunnes signaali ylittää *detector\_threshold* arvon.

Tilan ollessa *idle* ja *detector\_thresholdin* ylittyessä on havaittu kohteen nouseva reuna, luvun 4.4 testien perusteella laskettiin, että tällä nousevan reunan ajalla saadaan laskettua kohteen etäisyys tarkasti. Metodi tallettaa nousevan reunan ajan *target\_time micros()*-metodilla, tila asetetaan *activeksi*. *Active*-tilassa vain *lead\_pointteria* kasvatetaan, jolloin *tail\_pointer* jää tunnistusrajan ylittäneen näytteen edelliseen indexiin. *Active*-tilassa

olla, kunnes signaali tippuu *detector\_thresholdin* alle. On huomattava, että koska *dc\_leveliä* lasketaan while-silmukan alussa, se kasvaa huolimatta metodin tilasta. *Dc\_leveliä* kuitenkin siirretään vain 0,8 mV:n verran näytettä kohti, jolloin se ei kohteen aikana kerkeä nousta kuin muutaman mV:n, tämä ei ole merkityksellistä. On myös huomattava, että koska *tail\_pointer* jää paikalleen, *lead\_pointer* voisi periaatteessa kiertää koko kieroksen rengaspuskurin ympäri siten, että se ohittaisi *tail\_pointerin*. Tämä sekoittaisi myöhemmin tapahtuvan signaalin pinta-alan laskemisen. Tämä ei kuitenkaan käytännössä ole mahdollista, sillä testeissä osoittautui, että kohteet ovat maksimissaan noin kymmenen näytettä pitkiä.

Kun signaali tippuu *active*-tilassa *detector\_thresholdin* alle, on tunnistettu kohteen laskeva reuna. Kohteen amplitudi ja leveys lasketaan. Mitattavat kohteet ovat lähtökohtaisesti suuria, joista tulee amplitudilta ja/tai leveydeltään suuria signaaleja. *TargetDetectorissa* on määritelty kohteille tietyt kriteerit leveyden ja amplitudin suhteen, joista vähintään toisen tulee ylittyä kohteen hyväksymiseksi. Näillä kriteereillä suodatetaan kohteista pois heijastumien, mahdollisten yksittäisten virhenäytteiden tai muuten liian pienten kohteiden tunnistus. Kriteerien täytyessä metodi palauttaa kohteen. Jos kriteerit eivät täyty, tila asetetaan takaisin *idleksi*, *tail\_pointer* yhtä suureksi *lead\_pointterin* kanssa ja *target-Detectorin* while-silmukkaa jatketaan.

#### 4.5.4 TargetProcessor- ja printTargets-metodit

*TargetProcessor*-metodi lajittelee *targets*-tietueen oliot relevanssijärjestykseen, *arean* mukaan. Metodi laskee *targeteille* muuttujan *distance*, kaavaa (25) käyttäen. *Distance* on etäisyys kohteeseen [mm].

*PrintTargets*-metodit tulostavat *targets*-taulukon sarjaporttiin. *PrintTargets*-metodeja on kaksi, toinen tulostaa *targetit* relevanssi järjestyksessä ja toinen *targets*-taulukon indeksi järjestyksessä.

#### 4.6 Jatkotestaus

MaxBotix MB7076 -anturin toimintaa testattiin luvussa 4.5 kuvaillulla ohjelmalla. Testien tarkoituksena oli testata anturin keilanleveyttä, kantamaa, signaalin vaimenemista sekä lähekkäisten kohteiden tunnistamista toisistaan. Anturi kiinnitettiin 130 cm:n korkeudelle

kolmijalkaan, anturi asetettiin suoraan vatupassia käyttäen sekä silmämääräisesti arvioiden. 160 cm pitkistä, kovista, halkaisijaltaan 60 mm:n paksuisista pahviputkista tehtiin kaksi pientä piippua simuloivaa rakennelmaa. Putkien jalustoina käytettiin metallisia kaa-supulloja, joihin putket teipattiin kiinni. Pullot eivät vaikuta mittaustuloksiin.



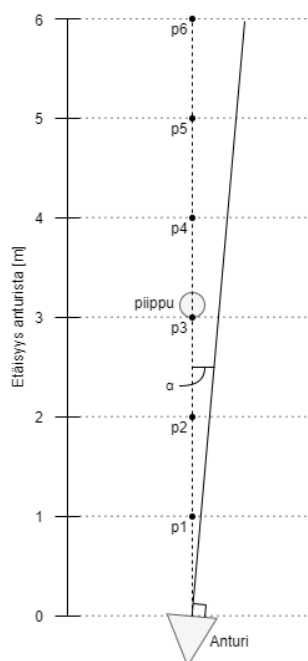
Kuva 11. Piippua simuloiva pahviputki ja mittatila.

Oli selvää, että ohjelman kohteidentunnistusrajoja tulisi hienosäätää etenkin kohinatason suhteen, sillä tämä oli aiemmin ohjelmaa kehittäessä arvioitu vain hyvin karkeasti. A/D-muuntimen Kohinatason selvittämiseksi, DC-tasokorjattuja näytteitä tulostettiin sarjamonitoriin *idle*-tilassa. Näytteet kopioitiin Exceliin, jossa niistä laskettiin keskihajonta sekä kvartiilit Excelin STDEV- sekä QUARTILE.INC-funktioita käyttäen. Taulukosta 3 huomataan, että signaalin kohina on hyvin pientä, maksimissaan vain noin 0,2 % A/D-muuntimen alueesta. *detector\_threshold* asetettiin tämän mittauksen perusteella noin kaksi kertaa kohinan maksimi tasoon.

Taulukko 3. MB7076-anturin kohina-analyysi.

Suure	A/D-muuntimen askelta	Jännite [mV]
Keskihajonta	1,704	1,373
Minimi	-4,000	-3,322
Ensimmäinen neljännes	1,701	1,370
Mediaani	0,000	0,000
Kolmas neljännes	1,712	1,379
Maksimi	9,000	7,251

*detector\_thresholdin* asettamisen jälkeen testattiin heijastusten vaimenemista. Lattiaan merkattiin mittapisteitä 1 m:n välein suoraan linjaan anturista 6 m:iin asti. Mittatilaa reunusti oikealla sivulla noin 1,2 m korkea pehmeä kankainen sermi noin 1 m:n päässä mittalinjasta, vasemmalla sivulla oli mittalinjasta noin 1 m:n etäisyydellä järjestyksessä tietokonepöytä, betoninen tolppa sekä pieni pala sermiä, joka käännettiin siten että se ei suoraan osoittanut normaalillaan anturiin. Mittatila päättyi noin 6,5 m:n päässä olevaan betoniseen seinään, jossa oli mittalinjan oikealla puolella 90 cm leveä oviaukko, jonka edessä ja takana oli portaita. Mittauksissa huomioitiin maksimissaan 4 relevanteinta kohdetta.



Kuva 12. Mittausjärjestely, jossa p1...p6 ovat suoraan linjaan 1 m välein merkityt mittapisteet, joihin putki asetoitiin siten, että sen etureuna oli mittapisteessä.  $\alpha$  on kulma anturin keskilinjan sekä mittapisteiden keskilinjan välillä.

Kappaleen 4.6.x taulukoissa *relevance* on kohteen relevanssi, *distance* on pulssin lentoajasta laskettu etäisyys kohteeseen [mm], *area* on kohteen pulssin A/D-muuntimen näytteiden summa, *width* on kohteen pulssin leveys [ $\mu$ s] ja *amplitude* on kohteen A/D-muuntimen suurin näyte.

#### 4.6.1 Mittaus 1

Ensimmäinen mittaus suoritettiin kuvan 12 mukaan, ilman putkea ja  $\alpha$  kulmalla  $0^\circ$  taustatason saamiseksi.

Taulukko 4. Etäisyysanturi, mittaus 1.

Relevance	distance	area	width	amplitude
1	6485	13772	991	408
2	7129	935	582	42
3	7235	201	142	32
4	6664	144	131	37

Mittauksesta huomattiin, että noin 6,5 m:n päässä oleva seinä on selvästi dominoiva kohde. Tästä todettiin, että mittatilaa reunustavat esineet eivät aiheuta merkittävää haittaa mittauksille.

#### 4.6.2 Mittaus 2

Toinen mittaus suoritettiin kuvan 12 mukaan,  $\alpha$  kulmalla  $0^\circ$ , siten että putki asetettiin jokaiseen mittapisteeseen vuorollaan.

Taulukko 5. Etäisyysanturi, mittaus 2.

Mittapiste $p$	Putken <i>distance</i>	Putken <i>area</i>	Suurin muun kohteen <i>area</i>
1	980	58930	513
2	1970	31824	367
3	2961	9936	384
4	3988	1376	297
5	4992	511	1381

Putkea ei tunnistettu 6 m:n etäisyydellä. Tämä todennäköisesti johtui siitä, että se oli hyvin lähellä mittatilan takaseinää. Lisäksi tunnistusrajat oli asetettu vielä epäoptimaalisesti.

#### 4.6.3 Mittaus 3

Mittaus 3 suoritettiin kuten luvun 4.6.2 mittaus 2, kuvan 12 mukaan, mutta  $\alpha$  kulmalla  $5^\circ$ .

Taulukko 6. Etäisyysanturi, mittaus 3.

Mittapiste $p$	Putken <i>distance</i>	Putken <i>area</i>	Suurin muun kohteen <i>area</i>
1	1004	53778	347
2	1999	25882	402
3	2970	10239	220
4	3981	1161	320

Anturi ei tunnistanut putkea mittapisteessä 5. Heijastunut signaali oli tällä etäisyydellä liian vaimentunut.

#### 4.6.4 Mittaus 4

Mittaus 4 suoritettiin kuten luvun 4.6.2 mittaus 2, kuvan 12 mukaan, mutta  $\alpha$  kulmalla  $11^\circ$ .

Mittapiste $p$	Putken <i>distance</i>	Putken <i>area</i>	Suurin muun kohteen <i>area</i>
1	1010	18554	1858
2	1999	3436	969

Anturi ei tunnistanut putkea mittapisteessä 3.

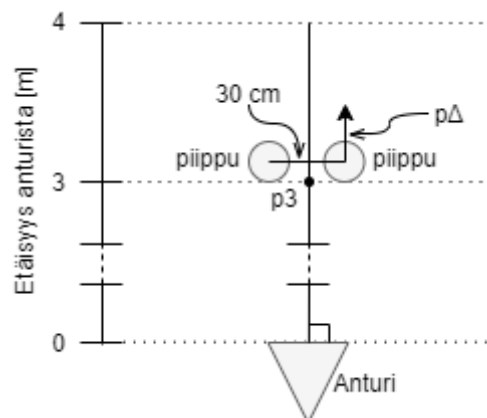
#### 4.6.5 Mittaus 5

Seuraavaksi tutkittiin anturin keilanleveyttä, kuvan 12 mukaisella järjestelyllä 1 m:n sekä 2 m:n etäisyydellä anturista. Putki asetettiin aluksi mittapisteeseen  $p1$ , sitten  $p2$ , kulmaa

$\alpha$  pienennettiin  $90^\circ$ :sta pienemmäksi, kunnes putki tunnistui toistuvasti juuri ja juuri. Vastauksen saamiseksi  $\alpha$  kerrottiin kahdella keilanleveyden saamiseksi oletuksella, että anturin keila on symmetrinen. Keilanleveydeksi 1 m:n päässä saatiin noin  $66^\circ$  ja 2 m:n päässä noin  $48^\circ$ .

#### 4.6.6 Mittaus 6

Seuraavaksi testattiin kahden lähekkäin olevan putken erottamista toisistaan syvyyssuunnassa. Mittausjärjestely oli kuvan 13 mukainen. Putket asetettiin 3 m:n päähän anturista, 30 cm:n päähän toisistaan putkien keskiakselilta mitattuna siten, että putket olivat symmetrisesti mittalinjan sivuilla. Toista putkea siirrettiin etäämmäs  $p\Delta$  metriä, kunnes sarjamonitoriin tuli kaksi kohdetta, toinen 3 m:n etäisyydeltä ja toinen vähän tämän takaa. Putket erottuivat omiksi kohteikseen,  $p\Delta$ :n ollessa noin 20 cm.



Kuva 13. Jossa  $p\Delta$  on toisen piipun siirtosuunta ja matka.

Taulukko 7. Yksi putki 3 m:n etäisyydellä.

Kohde	distance	area
1	2968	6292

Taulukko 8. Kaksi putkea 3 m:n etäisyydellä.

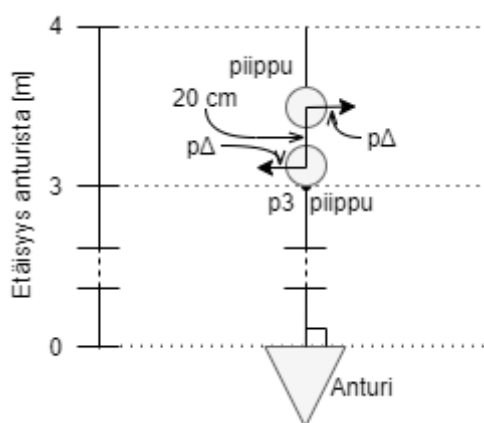
Kohde	distance	area
1	2953	13371



Taulukko 9. Kaksi putkea 3 m:n etäisyydellä,  $p\Delta$ :n ollessa noin 20 cm.

<i>Kohde</i>	<i>distance</i>	<i>area</i>
1	2960	8306
2	3117	2750

## 4.6.7 Mittaus 7



Kuva 14. Etäisyysanturin varjostustesti.

Seuraavaksi testattiin varjostuneen kohteen tunnistamista. Putket asetettiin peräkkäin mittalinjalle siten, että toinen putki oli 3 m:n etäisyydellä ja toinen 3,2 m:n etäisyydellä. Putkia siirrettiin mittalinjalta vastakkaisiin suuntiin  $p\Delta$ :n verran, kunnes kummatkin putket tunnistettiin, tämä tapahtui jo 6 cm:n erotuksella. Putkien *areoiden* suhde oli tällöin noin 1/10. 10 cm erotuksella putkien *areat* olivat samaa suuruusluokkaa.

## 4.7 Yhteenveto

MaxBotix MB7076 -etäisyysanturi osoittautui testeissä hyväksi valinnaksi. Keilanleveys on 2 m etäisyydellä noin  $50^\circ$ . Todellisuudessa mitattavat kohteet ovat usein vähintään noin 2 kertaa suurempia kuin testeissä käytetty pahviputki, näiden suurempien kohteiden tunnistaminen onnistuu oletettavasti vielä paremmin. Anturin syvyystarkkuus on noin  $\pm 1$  cm. Anturin tunnistamia kohteita jatkokäsittelään algoritmeilla, jotka eivät kuulu tämän opinnäytetyön aihepiiriin. Melumittauksissa etäisyysanturin toimintaetäisyyden tulee olla noin 1 – 5 m. Anturi toimi näillä etäisyyksillä hyvin.

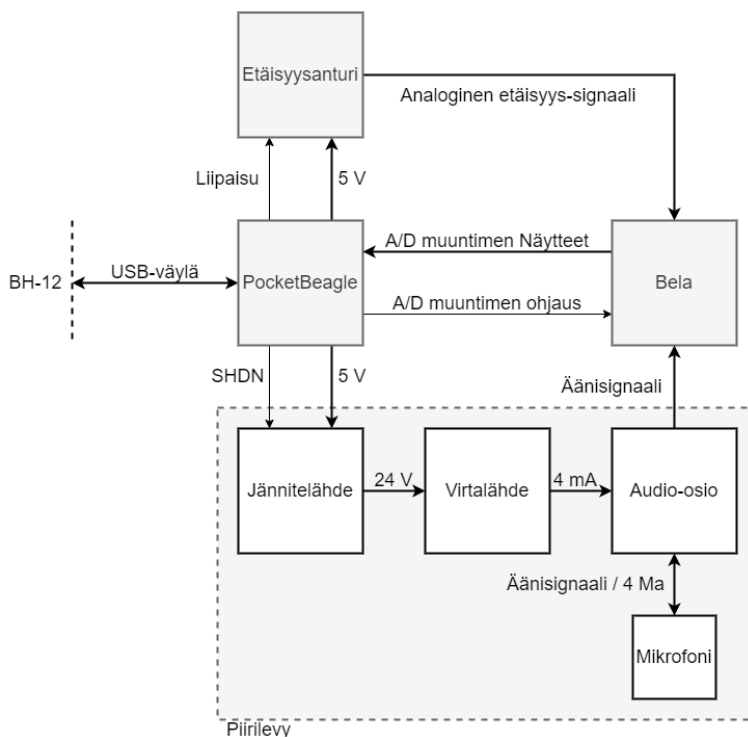
## 5 ELEKTRONIIKKA

Järjestelmän alustaksi valittiin BeagleBoard.org-säätiön PocketBeagle-kehityskortti. PocketBeagle on avoin laite tarkoittaen, että kaikki laitetta koskevat kytkentäkaaviot, piirilevylayoutit ja ohjelmistot ovat avoimesti saatavilla Git-tietovarastossa (engl. repository). Kortissa on Octavo Systemsin OSD3358 SiP (System-in-Package), joka sisältää 1 GHz:n kellotaajuudella toimivan ARM Cortex-A8 -ytimen ja 512 Mt DDR3 keskusmuistia [24]. Suurin syy kyseisen alustan valitsemiseen oli PocketBeaglelle saatava Bela Mini-kehityskortti ja Linux-pohjainen ohjelmistoalusta. Bela on Lontoossa Queen Mary yliopiston digitaalisen musiikin keskuksessa kehitetty pieniviiveinen avoimenlähdekoodin kehitysalusta. Bela Minin käyttö nopeuttaa ja helpottaa ohjelmistokehitystä merkittävästi, sillä äänitasomittarin sulautetun ohjelmiston tekeminen voisi olla opinnäytetyö itsessään.



Kuva 15. Bela Mini-kehityskortti.

PocketBeaglessa on kaksi kappaletta 2x18 pinnisiä riviliittimiä, 2,54 mm jaolla, Bela Mini kytkeytyy näihin piikkirimoilla. Mikrofonin ja Bela Minin väliin pitää suunnitella piirilevy, joka muuttaa USB-väylän jännitteen mikrofonille sopivaksi biasjännitteeksi, ja muuttaa mikrofonin signaalin A/D-muuntimelle sopivaksi. Suunnitelmana on kytkeä Bela Mini PocketBeaglen päälle piikkirimalla ja itsesuunniteltu piirilevy Bela Minin päälle piikkirimalla. Kun kyseinen konfiguraatio toimii, voidaan Bela Mini poistaa myöhemmistä versioista siirtämällä A/D-muunnin itsesuunniteltuun piirilevyyn. Kytkentäkaavio sekä piirilevy suunnitellaan avoimen lähdekoodin KiCad ohjelmistolla. Piirilevyyn tulee testauspiste jokaiselle tärkeälle solmupisteelle.



Kuva 16. Elektroniikan toteutus lohkokkaavio.

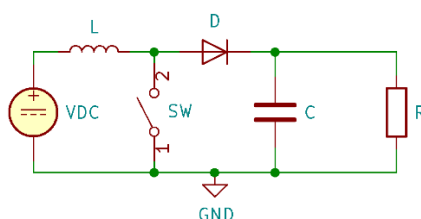
Äänitasomittareissa järjestelmän kohinataso on kriittinen ominaisuus, sillä se määrittää äänitasomittarin dynaamisen alueen alarajan. Droonikäyttöön tehtävässä prototyypissä järjestelmän kohinatasovaatimus jää varsin löyhäksi, sillä droonin taustamelu aiheuttaa joka tapauksessa merkittävän kohinan mittaukselle. Drooni aiheuttaa noin 50 dB:n kohinan, joka GRAS 146AE -mikrofonilla vastaa tehollisarvoltaan noin 316  $\mu\text{V}$  jännitettä. Audiotaajuuskaistan ulkopuolinen kohina saa olla suurempaa, sillä A/D-muunnin sisältää sisäänrakennettuja suodattimia, jotka vaimentavat näitä taajuuksia [25].

### 5.1 IEPE-mikrofoni

GRAS 146AE 1/2" CCP -vapaakenttämikrofoni vaatii toimiakseen vakaan 2 - 20 mA biasvirran. Datalehdessä biasjännitteen on kerrottu olevan tyypillisesti 16 V, toisaalta samassa datalehdessä on kerrottu lähtösignaalin olevan huippuarvoltaan 8 V, kun biasjännite on 28 V [21]. CCP on GRAS:sin termi markkinointitermi, joka tulee sanoista "constant current power" [21]. CCP Tarkoittaa käytännössä samaa toimintaperiaatetta kuin IEPE. Näillä pohjatiedoilla päätettiin suunnitella 24 V:n syötöllä toimiva virtalähde, jonka ulostulovirta on 4 mA. Suunnittelussa otettiin huomioon se, että ulostulovirtaa halutaan mahdollisesti muuttaa tulevaisuudessa.

## 5.2 Jännitelähde

Äänitasomittari saa käyttöjännitteensä BH-12 mittalaitteen USB-väylästä, jonka jännite on 5 V. Jännitettä tulee nostaa 24 V:n, jotta IEPE-mikrofonille saadaan tarvittava biasjännite ja -virta. Jännitettä nostetaan boost-tyyppisellä hakkuri jännitelähteellä.



Kuva 17. Boost-tyyppinen hakkuri jännitelähde.

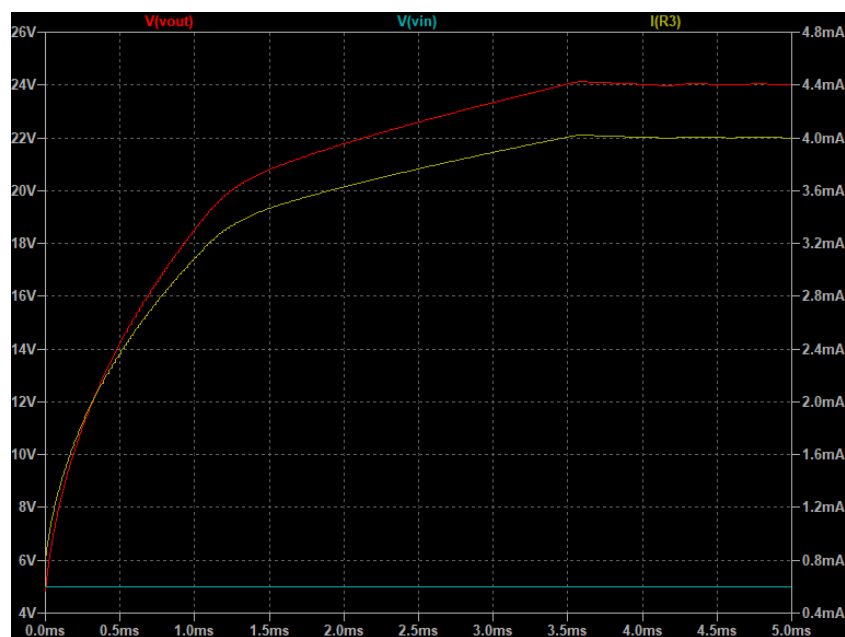
Kuvassa 17 on boost-tyyppinen hakkuri jännitelähde, jossa on tasajännitelähde  $V_{DC}$ , kela  $L$ , kytkin  $SW$ , diodi  $D$ , kondensaattori  $C$  sekä kuormavastus  $R$ . Jännitelähteen toiminta perustuu kelan kykyyn varastoida energiaa magneettikenttäänsä ja kelan kykyyn vastustaa lävitsensä kulkevan virran muutosta. Kun kytkin suljetaan, alkaa virta kulkea jännitelähteestä kelan ja kytkimen läpi maahan. Kelan resistanssi on olematon, joten kytkentä on tällöin oikosulussa. Kelan ympärille muodostuva magneettikenttä pyrkii vastustamaan kelan läpi kulkevan virran muutosta, täten oikosulkuvirta ei kasva välittömästi suureksi, vaan virran transientti on suhteellisen hidas. Kun kytkin avataan, pyrkii kelan ympärille muodostuva magneettikenttä taas vastustamaan virran muutosta. Tällä kertaa virta pienenee, joten magneettikentän suunta muuttuu, tällöin myös kelan yli oleva jännite  $V_L$  muuttaa suuntansa.  $V_L$  on tällöin sarjassa  $V_{DC}$ :n tuottaman jännitteen  $V_{IN}$  kanssa. Jännitelähteen lähdössä olevan kuormavastuksen yli tulee täten jännite  $V_{IN} + V_L - V_D = V_R = V_{out}$ ,  $V_D$  on diodin kynnysjännite. Diodi estää kondensaattorin purkautumisen maahan, kun kytkin on kiinni. Kun kytkin avataan, kondensaattoriin varautunut energia purkautuu ja syöttää kuormavastusta. Kytkimenä toimii usein eristehilatransistori, jonka tilaa ohjataan tarkoitukseen tehdyllä mikropiirillä kytkemistaajuudella  $F_{sw}$ , joka on usein noin 100 kHz – 2 MHz.

Jännitelähteeksi suunniteltiin 5 V syöttöjännitteellä  $V_{in}$  toimiva DC-DC jännitelähde. Kuvassa 19 on suunnitellun jännitelähteen kytkentäkaavio. Jännitelähde tuottaa 24 V lähtöjännitettä  $V_{out}$ . Mikropiiriksi valittiin Analog Devicesin (ent. Linear Technology) valmistama LT1610ISB. Mikropiirin ominaisuuksien ansiosta kytkentä tuottaa 24 V lähtöjännitettä 1 – 8 V syöttöjännitteellä. Mikropiirin  $F_{sw}$  on 2,0 MHz, jonka ansiosta voidaan

käyttää fyysisesti pieniä kondensaattoreita ja kela. Pienillä virroilla LT1610 toimii automaattisesti pursketilassa, jossa se lataa lähtöpuolen kondensaattoreita nopeilla 2,0 MHz purskeilla, virrasta riippuen noin 1 – 10 kHz taajuudella. Kondensaattorit C1, C2 ja C3 tasoittavat jännitteitä, kun mikropiirit ja muut kytkennän komponentit tarvitsevat energiaa. R1 ja R2 muodostavat takaisinkytkentäpiirin mikropiirille, vastusten arvot on laskettu LT1610-datalehdessä esitellyllä kaavalla [26]:

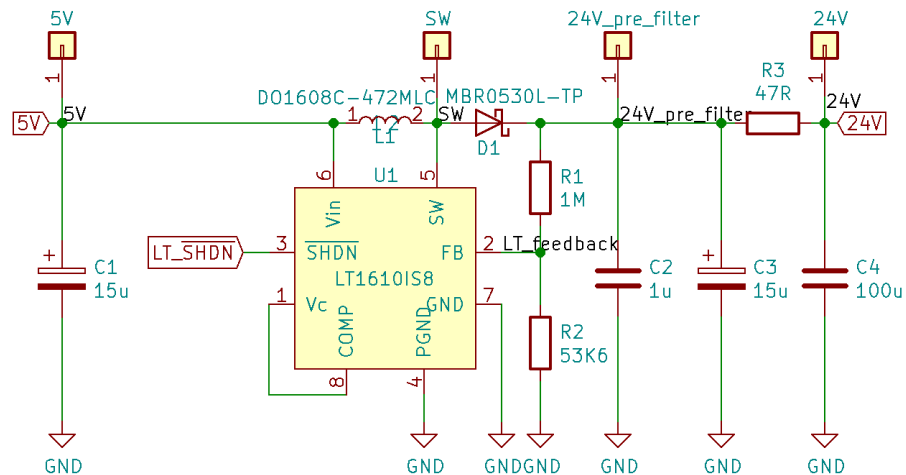
$$V_{out} = 1,23 \text{ V} \left( \frac{1 + R1}{R2} \right), \quad (27)$$

Lähtöjännitteeksi  $V_{out}$  haluttiin 24 V, R1:n vastusarvoksi valittiin hiha-arvona 1 M $\Omega$ , joten vastuksen R2 arvoksi tuli 51,25 k $\Omega$ . Hakkurin toiminta simuloitiin Analog Devices'in LTspice-simulointiohjelmalla. LTspicessä säädettiin vastuksen R2 arvoa, kunnes  $V_{out}$  oli 24,00 V.  $V_{out}$  oli 24,0 V, kun R2 oli 53,6 k $\Omega$ . Tämä valittiin lopulliseksi arvoksi R2:lle. Kuvassa 18 on LTspice-simulaation tulos.



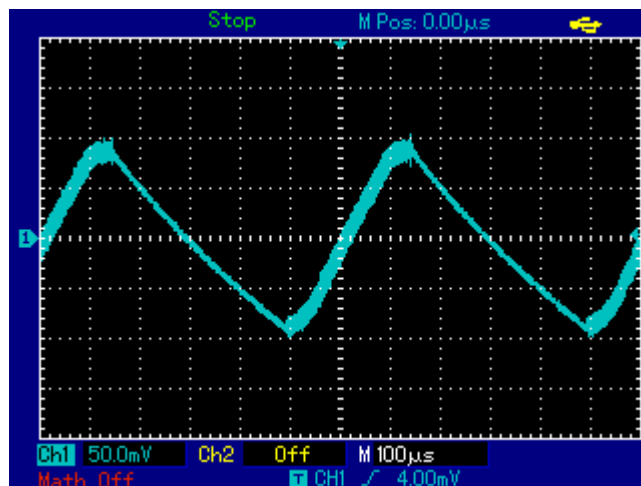
Kuva 18. LTSpice transienttisimulaatio hakkurista 4 mA kuormalla.

Diodiksi valittiin LT1610-datalehden suosittelema Motorolan MBR0530L-diodi. Kelaksi valittiin LT1610-datalehden suosittelema Coilcraftin DO1608 sarjan 4,7 mH kela [26].



Kuva 19. Suunniteltu jännitelähteen kytkentäkaavio komponenttiarvoineen.

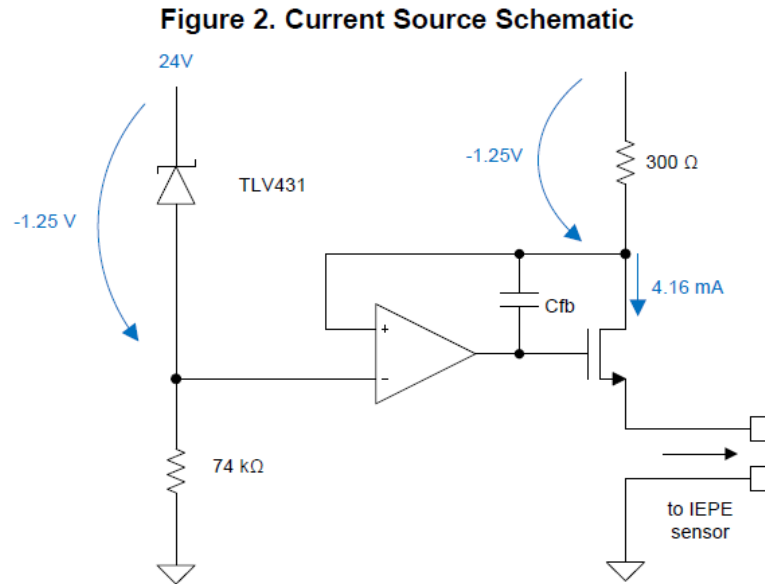
$R3$  ja  $C4$  muodostavat alipäästösuodattimen, jonka rajataajuus on 33 Hz. Suodattimen on tarkoitus vähentää LT1610:n pursketilan kHz-alueen rippeliä. A/D-muuntimen laskotumisenenestosuodatin vähentää rf-alueen kohinaa 20 dB [25], piirilevyn testausvaiheessa selviää riittäkö tämä, vai pitääkö suodatinta parantaa. Kuvassa 20 näkee pursketilan rf-kohinan, kun  $24V\_pre\_filter$  solmun kondensaattorit latautuvat. Kuvassa näkee myös kHz alueen rippelin.



Kuva 20. Oskilloskoopilla mitattu ac-jännite kytkennän  $24V\_pre\_filter$  solmussa.

### 5.3 Virtalähde

Tasaisen biasvirran tuottamiseksi päätettiin käyttää referenssinä Texas Instrumentsin TIDA-010045 "IEPE Sensor Analog Front-End With Digital Interface Reference Design" -dokumenttia. TI:n referenssikytkenässä vakiovirta tuotetaan referenssijännitekomponenttia, kahta vastusta ja operaatiovahvistinta hyödyntäen [27].



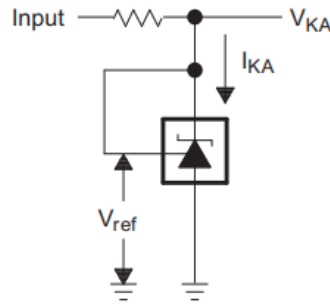
Kuva 21. TIDA-010045 referenssikytkenä [27].

TIDA-010045:tä referenssinä käyttäen suunniteltiin kytkentä, joka tuottaa tasaisen 4 mA virran millä tahansa tulojännitteellä  $V_{IN}$  välillä 5 – 36 V. Kuvassa 23 on kytkennän kytkentäkaavio. Virtalähde saa tulojännitteensä luvussa 5.2 esitellyltä jännitelähteeltä. Kytkennän referenssijännitekomponentin  $U_2$ :n katodin ja anodin yli jää jännite  $V_{ref}$ , jonka operaatiovahvistin  $U_3$  "kopioi" vastuksen  $R_5$  yli.  $U_2$ :n katodi ja  $R_5$ :n toinen jalka ovat samassa jännitteessä  $V_{IN}$ , joka on virtalähteen syöttöjännite. Kun vastuksen  $R_5$  yli on jännite  $V_{ref}$ , menee vastuksen  $R_5$  kautta virta  $I_{R5}$ , joka voidaan laskea kaavalla:

$$I_{R5} = \frac{V_{ref}}{R_5} = I_{OUT}, \quad (28)$$

jossa  $I_{OUT}$  on virtalähteen lähtövirta. Kaava (28) johdetaan tarkemmin kappaleessa 5.3.

Referenssijännitekomponentiksi valittiin Texas Instrumentsin TL431, jonka referenssijännite  $V_{ref} = 2,5 \text{ V}$ . TL431-piirissä on 3 pinniä, anodi, katodi ja referenssi. Kun komponentti kytketään kuvan 22 mukaan siten, että katodi ja referenssi ovat samassa jännitteessä, jää katodin ja anodin välille jännite  $V_{ref}$  [28]. Kuvan 22,  $V_{KA} = V_{IN}$ .



**Figure 20. Test Circuit for  $V_{KA} = V_{ref}$**

Kuva 22. TL431-datalehden esimerkkikytkentä [28].

TL431:n anodi on kytketty maahan vastuksen  $R_4$  kanssa, jonka avulla TL431-anodin ja maan välille jää jännite  $V_{TL\_regulated} = V_{IN} - V_{ref}$ . Vastus myös rajoittaa TL431:n kautta kulkevaa virtaa  $I_{KA}$ .  $I_{KA}$  voidaan laskea seuraavasti  $I_{KA} = \frac{(V_{KA} - V_{ref})}{R_4}$ , jolloin  $10 \text{ k}\Omega$  vastuksella ja  $24 \text{ V}$ :n  $V_{KA}$ :lla virraksi tulee  $2,15 \text{ mA}$ .  $I_{KA}$ :n tulee olla minimissään  $0,7 \text{ mA}$ , jotta komponentti toimii oikein [28].

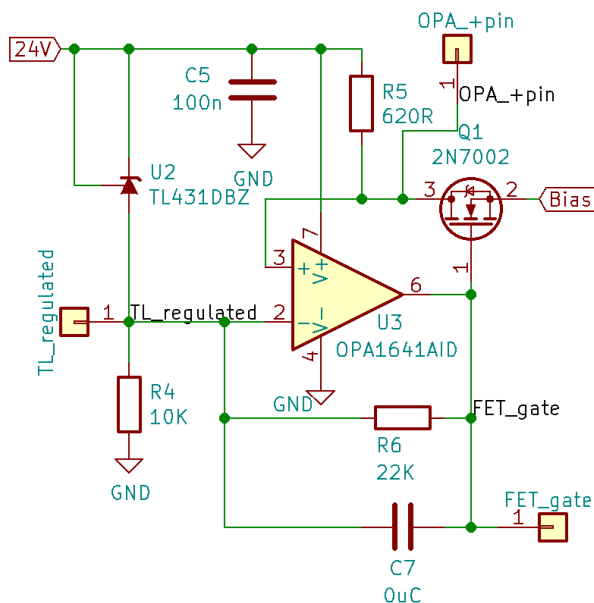
Operaatiovahvistimeksi  $U_3$  valittiin Texas Instrumentsin OPA1641 SoundPlus™, joka on erityisesti audiosovelluksiin suunniteltu. Kyseiseen komponenttiin päädyttiin Texas Instrumentsin internet-sivuilta löytyvän valintatyökalun avulla. Operaatiovahvistin on negatiivisesti takaisinkytketty, toisin kuin TIDA-010045 referenssikytkenässä, jolloin  $U_3$  pyrkii saamaan pluspinniinsä (positiivinen sisääntulo) saman potentiaalin kuin miinuspinniin (negatiivinen sisääntulo). Miinuspinni on kytketty samaan potentiaaliin TL431-anodin kanssa, jolloin sen jännite on  $V_{TL\_regulated}$ .  $V_{IN}$  on kytketty pluspinniin vastuksella  $R_5$ , vastuksen yli jää täten jännite  $V_{ref}$ . Virta vastuksen  $R_5$  läpi voidaan laskea kaavalla (28). Virta  $I_{R5}$  menee kokonaisuudessaan eristehilatransistorin  $Q_1$  läpi, sillä  $U_3$ :n pluspinnin sisääntulovastus on  $10 \text{ T}\Omega$  [29]. Eristehilatransistorin rakenteen vuoksi  $Q_1$ :n vuotovirta nielusta hilaan on käytännössä mitätön, jolloin  $I_{R5}$  menee kokonaisuudessaan virtalähteen lähtöön. Täten  $I_{OUT} = I_{R5}$ .



$U_3$ :n takaisinkytkentäpiirissä on  $22\text{ k}\Omega$  vastus  $R_6$ , joka varmistaa vahvistimen stabiiliuden. Vastuksen rinnalla on myös kalustamaton paikka kondensaattorille  $C_7$ , joka helpottaa kytkennän korjaamista, jos siinä ilmenee ongelmia stabiiliuden kanssa.  $U_3$ :n datalehdessä suositellaan keraamisia matalan-ESR:n omaavia  $100\text{ nC}$  ohituskondensaattoreita  $V_-$  ja  $V_+$  pinnien välittömään läheisyyteen [29].  $C_5$ :ksi valittiin keraaminen  $100\text{ nC}$  X7R-sarjan dielektrinen kondensaattori. Ohituskondensaattoreita on vain yksi, koska  $U_3$ :n  $V_-$  on kytketty maihin.

$U_3$  ohjaa lähdöllään  $Q_1$ :n hilaa. Kun virtalähteen lähtöön  $I_{Out}$  kytketään erilaisia kuormia  $R_{Load}$ , joiden yli jää jännite  $V_{Load}$ , ohjaa  $U_3$  hilaa siten, että  $Q_1$ :n  $V_{DS}$  jännitteeksi jää  $V_{DS} = V_{IN} - V_{R5} - V_{Load}$ .  $V_{DS}$  muuttuu tällöin  $V_{Load}$ :n vastaisesti, olettaen että  $V_{R5}$  ja  $V_{IN}$  pysyvät vakiona.

$Q_1$ :n tehtävänä on myös nostaa virtalähteen lähtöimpedanssia. Kun virtalähteen lähtöimpedanssi on suuri, menee virtalähteestä tuleva virta kokonaisuudessaan kuormaan. Ilman  $Q_1$ :tä virtalähteen lähtöimpedanssi olisi vain  $R_4 + R_6 = 32\text{ k}\Omega$ , kun se on nyt käytännössä ääretön.  $Q_1$ :ksi valittiin 2N7002.



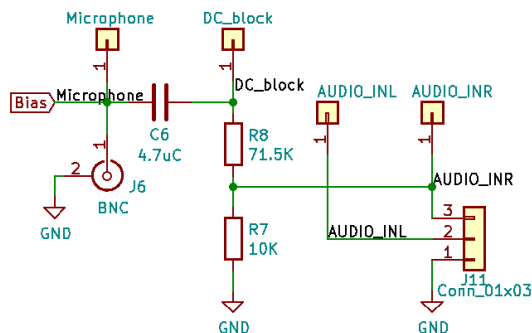
Kuva 23. Suunniteltu virtalähteen kytkentäkaavio komponenttiarvoineen.

## 5.4 Audio-osio

Audio-osio saa biasvirran kappaleen 5.3 virtalähteen lähdöstä. Mikrofonin tulee kiinni BNC-liittimeen. C6 katkaisee DC-virran kulun tasajännitteelle, täten biasvirta ei pääse A/D-muuntimelle. GRAS 146AE -mikrofoni kykenee mittaamaan maksimissaan SPL 133 dB äänitason, 2 dB:n epävarmuudella. Maksimiäänitaso on täten 135 dB, joka vastaa noin 112,47 Pa äänenpainetta. Mikrofonin vasteen ollessa huippuarvoltaan  $50 \text{ mV/Pa} \times \sqrt{2} = 70,71 \text{ mV/Pa}$  on mikrofonin suurin lähtöjännite  $70,71 \text{ mV/Pa} \times 112,47 \text{ Pa} = 7,953 \text{ V}$ . TLV320AIC3104 A/D-muuntimen maksimi sisääntulojännite on huippuarvoltaan 1,00 V [25], jolloin mikrofonin jännitettä tulee jakaa vastuksilla. Vastusten R8 ja R7 suhde laskettiin jännitteenjakajan kaavalla:

$$V_{out} = \frac{V_{in} \times R_8}{(R_7 + R_8)}, \quad (29)$$

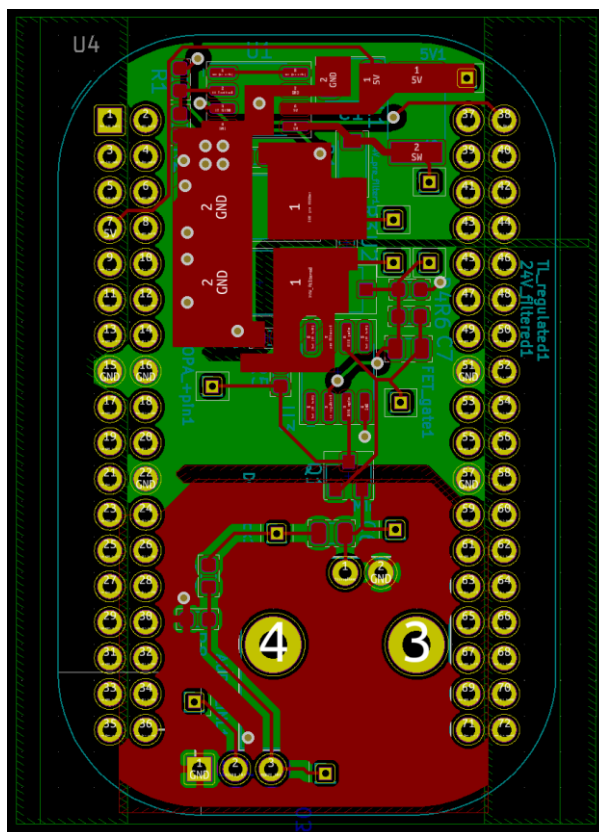
jossa  $V_{in}$  on jännitteenjakajaan tuleva jännite ja  $V_{out}$  on vastusten väliin jäävä jännite. A/D-muuntimen dynaaminen alue on 92 dB, näin ollen A/D-muunnin on "viritetty" 43 – 135 dB äänenpainetasolle [25].



Kuva 24. Audio-osion kytkentäkaavio komponenttiarvoineen.

## 5.5 Piirilevyn suunnittelu

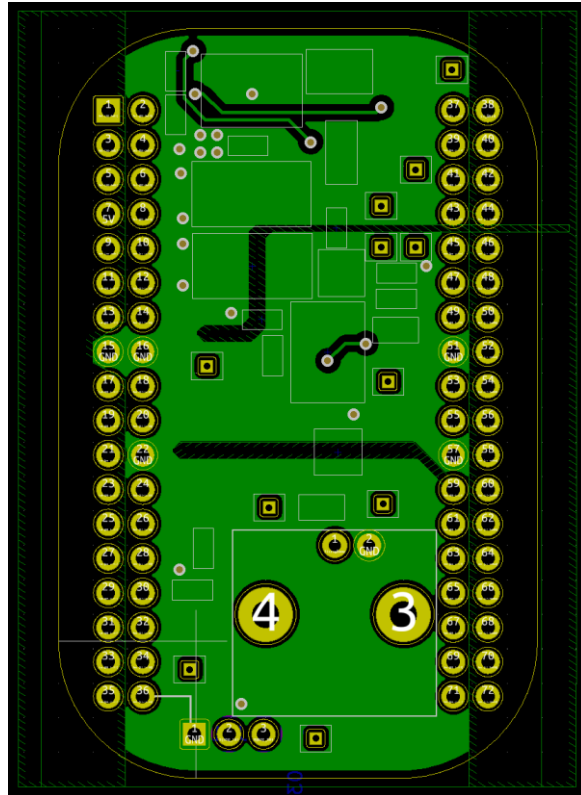
Piirilevy suunniteltiin KiCadin PcbNew layout-ohjelmalla. Suunnittelun lähtökohtana oli sijoittaa hakkuri ja audio-osio piirilevyn vastakkaisiin päihin, häiriöiden minimoimiseksi. KiCadista löytyi valmiina PocketBeagle komponentti, joten 2x18 pinnisten riviliittimien sijainnit, sekä piirilevyn raja (engl. edge cuts) olivat heti oikeassa kohdassa. Piirilevylle lisättiin kalustamattomia 1x1 pinnisiä riviliitinpaikkoja, jotta solmupisteiden jännitteet olisi helppo mitata.



Kuva 25. Piirilevyn layout, punainen kuvaa etupuolen kuparitasoa ja vihreä taustapuolen kuparitasoa.

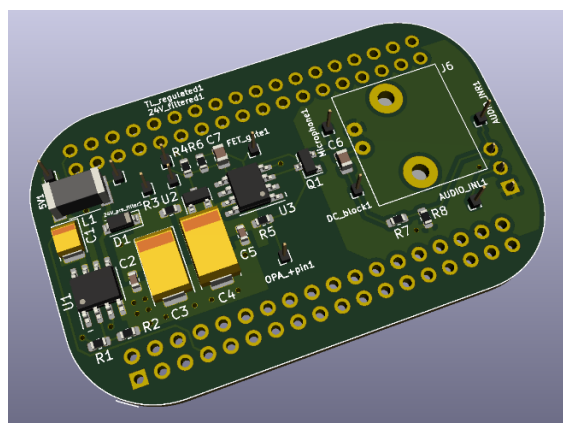
Mikrofonin signaali kytkeytyy Bela Minin IN-liittimeen J11 naarasrimalla. Bela Minin IN-liitin on Molex KK 254 -sarjan liitin, jossa on lukitusnasta. IN-liittimen pariaksi valittiin 3-pinninen standardi naarasrima 2,54 mm jaolla. 2x18 pinniset riviliittimet kytketään standardi 2,54 mm jaollisella piikkirimalla. Bela Minin layout on vapaasti saatavilla, mutta se on tehty Eagle-ohjelmistolla, jota ei ollut käytettävissä, joten liittimen paikka mitattiin työntömitalla.

Vetojen leveys on pääosin 0,250 mm. Hakkurin layout on tehty melko tarkasti LT1610-datalehden suositusten mukaan. Kaikki vastukset ovat tuumaisilla 0603-koteloilla. C1, C3, ja C4 ovat matalan ESR:n tantaalikondensaattoreita. C2, C5 ja C6 ovat X7R-sarjan keraamisia kondensaattoreita.



Kuva 26. Piirilevyn layoutin taustapuolen kuparitaso.

Taustapuolen maataso jaettiin kolmeen osaan, hakkuri, virtalähde sekä audio-osio ovat eroteltu toisistaan. Jaottelu ja osioiden sijoittelu vähentää hakkurin kohinan vaikutusta ääneen, sillä hakkurin maatasen virrat eivät kohtaa äänisignaalin maatasen virtojen kanssa.



Kuva 27. PcbNew ohjelman avulla tehty 3D-malli piirilevystä.

## 5.6 Piirilevyn testaus

Piirilevyt ja komponentit tilattiin toimittajilta. Piirilevyt juotettiin käsin, osio kerrallaan. Ensin juotettiin hakkuri, jonka toiminta testattiin juottamisen jälkeen. Samoin toimittiin virtalähteen sekä audio-osion kanssa. Virtalähdettä mitatessa, vastuksen  $R5$  mitoituksessa huomattiin virhe.  $R5$  oli laskettu virheellisesti referenssijännitepiiri TLV431:n referenssijännitteen 1,25 V mukaan, kun käytetyn TL431-piirin referenssijännite on 2,5 V. TL431:n referenssijännite on kaksinkertainen TLV341:n referenssijännitteeseen verrattuna, joten ongelma korjattiin juottamalla kaksi virheellisesti laskettua 312  $\Omega$  vastusta sarjaan, jolloin vastuksen läpi menevä virta  $I_{R5}$  on oikea. Kuvassa 23 on oikea vastusarvo. Kun kaikki komponentit oli juotettu, piirilevy kytkettiin piikkirimoilla Bela Miniin ja PocketBeagleen. PocketBeagleen tehtiin yksinkertainen ohjelma, jolla voidaan ohjata LT1610-mikropiirin  $SHDN$ -pinniä.

### 5.6.1 DC-toiminta

BNC-liittimeen kytkettiin erikokoisia vastuksia väliltä 10  $\Omega$  – 2,2 k $\Omega$ , tällä testattiin virtalähteen ulostulovirran vakioisuutta. Piirilevyn DC-jännitteet solmupisteistä mitattiin UNIT UT139C -yleismittarilla.

Taulukko 10. Eri kuormilla mitattuja DC-jännitteitä virran laskemiseksi.

Kuorma	$\infty \Omega$	10 $\Omega$	47 $\Omega$	100 $\Omega$	220 $\Omega$	1k $\Omega$	2k2 $\Omega$
<b>Mittapiste</b>							
<b>24V_filtered [V]</b>	23,98	23,79	23,79	23,79	23,80	23,80	23,80
<b>TL_regulated [V]</b>	21,48	21,29	21,29	21,30	21,30	21,30	21,30
<b>OPA_+pin [V]</b>	23,88	21,30	21,30	21,30	21,30	21,30	21,31
<b><math>I_{R5}</math> [mA]</b>	1,6	3,99	3,99	3,99	4,01	4,01	3,99

Taulukosta 10 huomataan, että virtalähde toimii suunnitellusti. Solmupisteen  $TL\_regulated$  jännite  $V_{TL\_regulated}$  kopioituu solmupisteeseen  $OPA\_+pin$   $\pm 10$  mV tarkkuudella. Mitastuloksista voidaan laskea Ohmin lailla, että  $R5$ :den läpimenevä virta on kaikilla paitsi äärettömällä kuormalla 4,00 mA, tarkkuudella  $\pm 10$   $\mu$ A.

Taulukko 11. Piirin DC-toiminta GRAS 146AE mikrofonilla.

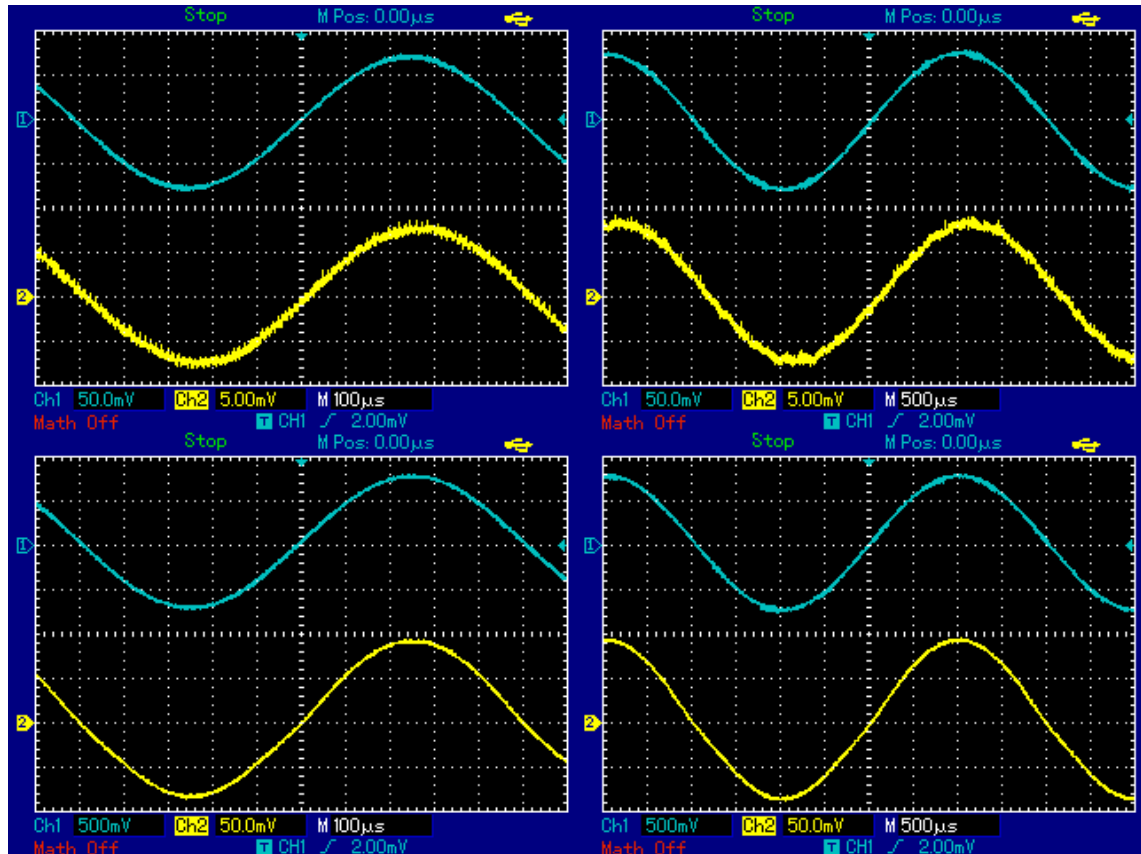
Solmupiste	Laskettu jännite [V]	Simuloidulla 24V_pre_filter jännitteellä laskettu jännite [V]	Mitattu jännite [V]
5V	5,0	5,0	4,992
24V_pre_filter	22,95	24,0	24,03
24V	22,56	23,61	23,67
TL_regulated	20,06	21,11	21,17
OPA_+pin	20,06	21,11	21,19
Microphone	-	-	15,87
DC_block	0,0	0,0	0,004

Taulukon 11 mittaustuloksista nähdään, että piiri toimii DC:n osalta suunnitellusti. LTspice-simulaation 24V\_pre\_filter jännite on huomattavasti lähempänä mitattua, kuin datalehdien kaavalla (27) laskettu. Mittaustuloksista voidaan laskea mikrofonin resistanssiksi 3,96 kΩ.

### 5.6.2 Audio-osio

Mikrofonin toiminta testattiin kytkennän kanssa. GRAS 146AE -mikrofoni kytkettiin BNC-kaapelilla piirilevyyn. Mikrofoniiin syötettiin tiedettyä äänenpainetasoa Norsonic Nor1256 -äänitasokalibraattorilla. Mikrofonin vasteeksi mitattiin 94,0 dB:n äänenpainetasolla noin 75 mV jännite, sekä 250 Hz että 1 kHz taajuuksilla. 114,0 dB:n äänenpainetasolla vasteet olivat vastaavasti noin 750 mV. Mikrofonin mukana tulleen kalibrointilapun mukaan kyseisen mikrofonin vasteen pitäisi olla 51,70 mV/Pa, kun se oli mittauksissa noin 75 mV/Pa. Kalibrointilapun 51,70 mV on täten tehollisarvo, sillä  $51,70 \text{ mV} \times \sqrt{2} = 73,11 \text{ mV}$ , joka on epävarmuuden rajoissa oikea vaste.

Kuvassa 28 on GRAS 146AE-mikrofonin vasteet Norsonic Nor1256 -äänitasokalibraattoriin. Mittausjärjestely oli seuraavanlainen, piirilevyn BNC-liittimeen kytkettiin T-liitin, johon kytkettiin mikrofoni sekä oskilloskoopin Kanava 1 (sininen). Kanava 2 (keltainen) on mitattu liittimen J11 pinnistä 3. Vasemmassa yläkulmassa äänitasokalibraattori oli säädetty 94 dB äänitasoon ja 1 kHz taajuuteen, oikeassa yläkulmassa 94 dB äänitasoon ja 250 Hz taajuuteen, vasemmassa alakulmassa 114 dB äänitasoon ja 1 kHz taajuuteen ja oikeassa alakulmassa 114 dB äänitasoon ja 250 Hz taajuuteen.



Kuva 28. GRAS 146AE vasteet äänitasokalibraattoriin.

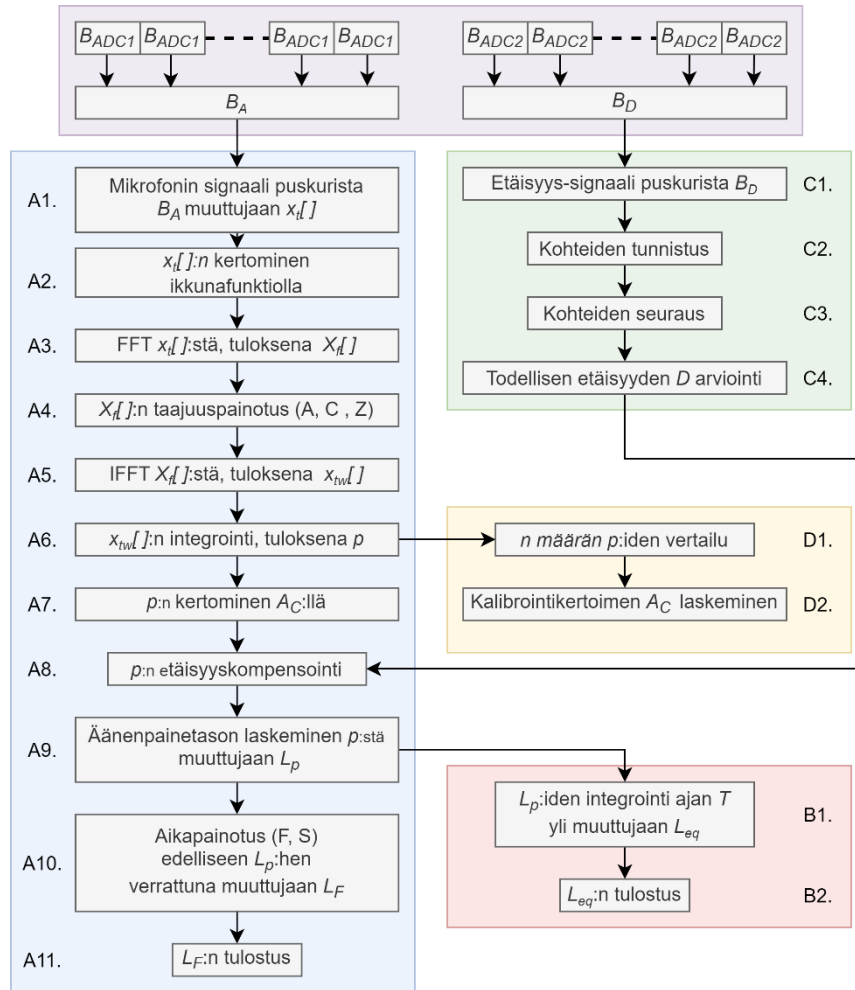
Piirilevy toimii kokonaisuudessaan suunnitellusti. DC-jännitteet olivat halutunlaiset ja mikrofonin vaste oli datalehden määrittämä. Elektroniikkaa on hyvä jatkokehittää tästä prototyyppivaiheesta, kun kaikki toimii suunnitellusti.

## 6 OHJELMISTO, INTEGROINTI JA VIIMEISTELY

Äänitasomittarin ohjelmisto kehitettiin Bela-IDE:llä. Kun PocketBeaglen kytkee USB-johdolla tietokoneeseen, voi IDE:n avata selaimella. Ohjelmointikielenä on C++. Belan-ohjelmat toimivat samantyyppisesti Arduino-ohjelmien kanssa. Kummassakin on *setup*-metodi, joka suoritetaan, kun ohjelma alkaa. Arduinossa on *loop*-metodi, joka pyörii ikuisessa silmukassa *setup*-metodin jälkeen. Belassa *loop*-metodia vastaa *render*-metodi, joka suoritetaan aina, kun määritetty määrä näytteitä on saapunut luettavaksi näytepuskureihin  $B_{ADC}$ . Koska *render*-metodi pyörii reaaliajassa, tulee sen olla suoritettuna ennen kuin uudet näytteet ovat saapuneet  $B_{ADC}$ :hen. Muulloin kaikkia  $B_{ADC}$ :n näytteitä ei kyetä käsittelemään.  $B_{ADC}$ :n koko voi olla esimerkiksi 16, 64 tai 128 näytettä. Bela Minissä on kaksi A/D-muunninta, TLV320AIC3104 sekä AD7699. TLV320AIC3104 muuntaa mikrofoni analogisen audio-signaalin puskuriin  $B_{ADC1}$ . AD7699 muuntaa etäisyysanturin analogisen aika-jännite signaalin puskuriin  $B_{ADC2}$ . Näytteet ovat 32-bittisiä liukulukuja. Kummankin A/D-muuntimen näytteistystaajuus  $f_s$  on 44,1 kHz.

Kuvan 29 violetti lohko kuvaa *render*-metodin toimintaa. Yhden *render*-kutsun aikana siirretään  $B_{ADC1}$ :n näytteet  $B_A$ :han, ja  $B_{ADC2}$ :n näytteet  $B_D$ :hen. Koska  $B_A$  ja  $B_D$  ovat huomattavasti  $B_{ADC1}$ :tä ja  $B_{ADC2}$ :tä suurempia, menee  $B_A$ :n ja  $B_D$ :n täyttöön useampi *render*-kutsu.  $B_A$  ja  $B_D$  puskureita on kumpiakin kaksi. Puskureiden välillä vuorotellaan siten, että kun toiseen puskuriin tallennetaan näytteitä, toista käsitellään luvussa 6.1 kuvaillulla tavalla. Tällöin puskurin käsittelyyn on aikaa  $B_A$ :n (tai  $B_D$ :n) koon verran, joka on esimerkiksi 8192 näytteen puskurilla  $8192 / f_s \approx 186$  ms.  $B_A$ :n ja  $B_D$ :n kokoa kuvaa muuttuja  $N$ .  $N$ :n tulee olla  $2^n$ , jossa  $n$  on kokonaisluku, sillä  $N$  on myös FFT:hen menevän aikatazon signaalin koko. FFT toimii tehokkaimmin, kun aikatazon näytteiden määrä on  $2^n$  [30]. Etäisyysanturin ohjelma toimii samantyyppisesti kuin liitteessä 1. Yhtä  $B_A$ :ta varten mitataan yksi mittaus etäisyysanturilla. Etäisyysanturin ohjelmaa kuvaa kuvan 29 vihreä lohko.





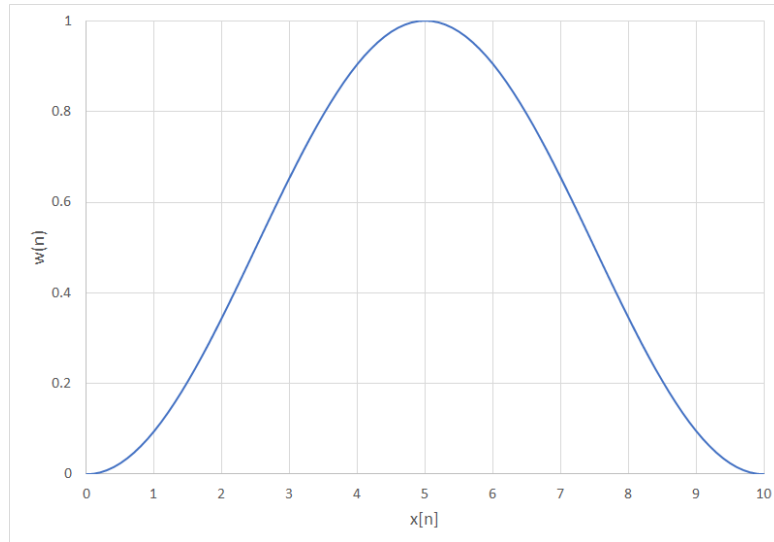
Kuva 29. Äänitasomittarin ohjelmiston lohkokaavio.

## 6.1 Audio-signaalinkäsittely

Audio-signaalinkäsittelyn on tarkoitus muuttaa A/D-muuntimelta tulevien dimensiottomien näytteiden sarja ekvivalentiksi äänenpainetasoksi  $L_{eqT}$ . Kuvan 29 sininen lohko kuvaa audio-signaalinkäsittelyn vaiheita. Ääninäytteet siirretään *render*-metodissa  $B_{ADC1}$ -puskurista  $B_A$ -puskuriin. Kohdassa A1,  $B_A$ :n näytteet kopioidaan taulukkoon  $x_t[ ]$ .  $x_t[ ]$  on FFT:hen menevä aikataason signaali.  $x_t[ ]$ :n näytteiden määrä on  $N$ . Koska FFT olettaa aikataason signaalin olevan jaksollisen signaalin yksi jakso, tulee  $x_t[ ]$  kertoa ikkunafunktiolla. Ikkunafunktiona käytetään Hann-ikkunaa. Hann-ikkunan kerroin  $w$ , voidaan laskea jokaiselle aikataason näytteelle  $x_t[ ]$  kaavalla:

$$w(n) = 0,5 \left( 1 - \cos \frac{2\pi n}{N} \right), \quad (30)$$

jossa  $N$  on aiemmin kappaleessa esitelty  $N$ , ja  $n$  on näytteen numero. Kuvassa 30 on esimerkki Hann-ikkunasta 11-näytteiselle signaalille.



Kuva 30. Hann-ikkuna.

Kun aikatazon signaali kerrotaan Hann-ikkunalla, lähenevät signaalin alku ja loppu nol-laa, jolloin mahdollinen epäjatkuvuus poistuu. Ikkunafunktiolla kertominen tapahtuu koh-dassa A2. Itse ikkunafunktio lasketaan *setup*-metodissa kaavalla (30).

Kohdassa A3, suoritetaan  $x_t[ ]$ :lle FFT, jonka tuloksena saadaan  $x_t[ ]$ :tä vastaava taajuustason signaali  $X_f[ ]$ . FFT:stä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 6.1.1.  $X_f[ ]$ :n taajuuskomponentit kerrotaan *setup*-metodissa lasketulla taajuuspainotuksella, joka voi olla A, C tai Z. A, C ja Z -taajuuspainotusten kertoimet lasketaan kullekin taajuuskomponentille  $X_f[ ]$ , IEC 61672-1:2013 -standardissa määritellyillä kaavoilla [1]:

$$A(f_n) = 10 \log_{10} \left( \frac{f_{s4}^2 f^4}{(f^2 + f_{s1}^2)(f^2 + f_{s2}^2)^{\frac{1}{2}}(f^2 + f_{s3}^2)^{\frac{1}{2}}(f^2 + f_{s4}^2)} \right)^2 \text{ dB} - A_{1000}, \quad (31)$$

$$C(f_n) = 10 \log_{10} \left( \frac{f_{s4}^2 f^2}{(f^2 + f_{s1}^2)(f^2 + f_{s4}^2)} \right)^2 \text{ dB} - C_{1000}, \quad (32)$$

ja:

$$Z(f_n) = 0 \text{ dB}, \quad (33)$$

joissa  $f_{s1}$ ,  $f_{s2}$ ,  $f_{s3}$  ja  $f_{s4}$  ovat IEC 61672-1:2013 -standardissa määritellyjä taajuuksia, ja  $A_{1000}$  ja  $C_{1000}$  ovat IEC 61672-1:2013 -standardissa määritellyjä desibelimääriä, joilla painotusten kerroin on 1 kHz taajuudella tasan 0,0 dB [1]. Taajuuspainotus tehdään kohdassa A4. Kohdassa A5, taajuuspainotettu  $X_f[\ ]$  muutetaan takaisin aikatasoon IFFT:llä. Taajuuspainotettu aikatason signaali on  $x_{tw}[\ ]$ .

Kohdassa A6, edelleen dimensiota  $x_{tw}[\ ]$  integroidaan kaavaa (6) soveltaen. Kohdassa A7, dimensiota  $x_{tw}[\ ]$  kerrotaan kalibrointikertoimella  $A_C$ . Tuloksena saadaan  $p$ , jonka yksikkö on [Pa]. Kohdassa A8  $p$  etäisyyskompensoidaan kuvan 29 vihreästä lohkoista tulevan etäisyystiedon  $D$  kanssa. Kohdassa A9 lasketaan  $p$ :stä äänenpainetaso  $L_p$  kaavalla (4). Käyttäjälle välittyvä hetkellinen äänenpainetaso  $L_F$  aikapainotetaan kaavaa (7) soveltaen. Aikapainotus tapahtuu kohdassa A10. Kohdassa A11,  $L_F$  välitetään sarjaväylää pitkin BH-12 mittalaitteeseen, ja sieltä edelleen ACS-pilvipalveluun, josta käyttäjä näkee hetkellisarvon.  $L_{eqT}$  lasketaan integroimalla useampi  $L_p$  ajan  $T$  yli.

### 6.1.1 Fourier-muunnos

Fourier-muunnos muuttaa signaalin aikatasosta taajuustasoon. Aikatason signaalia kuvataan symbolilla  $x[\ ]$  (pieni x) ja taajuustason signaalia symbolilla  $X[\ ]$  (iso X). Käytännössä Fourier-muunnos lasketaan DFT:llä (Diskreetti Fourier-muunnos). Kompleksisella DFT:llä voidaan laskea taajuustason reaaliset ja kompleksiset komponentit kaavoilla:

$$\text{Re } X[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right), \quad (34)$$

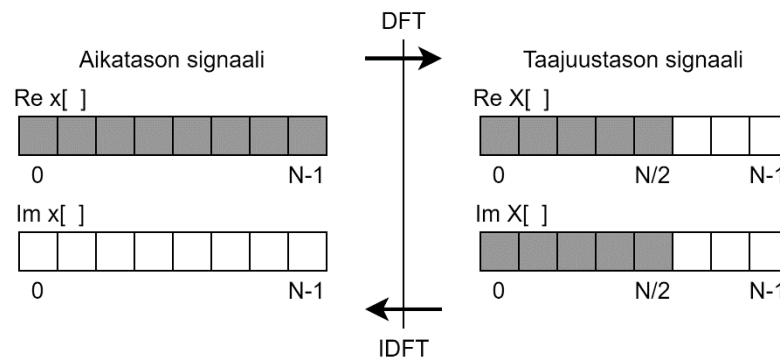
ja:

$$\text{Im } X[k] = - \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right), \quad (35)$$

joissa  $N$  on aikatason signaalin näytteiden määrä, ja  $k$  on taajuustason taajuuskomponenttien määrä, joka menee välillä  $0, \dots, N-1$ . Käytännössä DFT lasketaan FFT:llä (nopea Fourier-muunnos), joka laskee DFT:n tehokkaammalla algoritmilla. Tarvittavien laskentaoperaatioiden määrä DFT:lle on  $N^2$ , kun FFT:llä laskiessa se on  $N \log_2 N$ , Näin ollen laskentaoperaatiota tulee  $N$ :n ollessa 8192, DFT:llä 67108864, ja FFT:llä 106496.  $X[k]$ :n taajuusresoluutio  $f_\Delta$  voidaan laskea kaavalla:

$$f_\Delta = \frac{f_s}{N}, \quad (36)$$

jossa  $f_s$  on aikatason signaalin näytteistystaajuus [Hz] ja  $N$  on aikatason signaalin näytteiden lukumäärä.  $X[n]$ :n taajuuskomponenttien taajuudet voidaan laskea kaavalla  $f_\Delta \times n$ . Kuva 31 havainnollistaa DFT-operaatiota. IDFT (Käänteinen diskreetti Fourier-muunnos) muuttaa taajuustason signaalin takaisin aikatason signaaliksi. [30]



Kuva 31. DFT.

Nyquistin taajuus  $f_{Nyquist}$  on  $f_s/2 = f_{\frac{N}{2}}$ , siis  $X[N/2]$ :n taajuus on Nyquistin taajuus. Nyquistin taajuutta suurempia taajuuksia ei voida aikatason signaalista tunnistaa, sillä ne laskostuvat. Näin ollen ei voida tietää, mikä alkuperäisen signaalin taajuus oli [31]. DFT:n tuloksena Nyquistin taajuutta suuremmille taajuuksille tulee Nyquistin taajuutta pienempien taajuuksien peilikuva, tähän ilmiöön ei tässä työssä perehdytä.  $X[k]$ :n taajuuskomponenttien amplitudit  $A[n]$  voidaan laskea Pythagoraan lausetta hyödyntäen kaavalla [31]:

$$A[n] = \frac{\sqrt{\text{Re}(X[n])^2 + \text{Im}(X[n])^2}}{N}, \quad (37)$$

ja vastaavat vaiheet  $\varphi[n]$  [rad] kaavalla [31]:

$$\varphi[n] = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(X[n])}{\text{Re}(X[n])} \right). \quad (38)$$

On olemassa useita FFT-algoritmeja, joista opinnäytetyössä käytettiin Cooley-Tukey-algoritmia. Työssä suunnitellun mittarin  $f_s = 44,1$  kHz ja  $N = 8192$ , jolloin taajuusresoluutioksi voidaan laskea kaavalla (36) noin 5,38 Hz, ja taajuuskaistaksi 0 – 22,05 kHz.

## 6.2 Kalibrointi

Kun moduuliin lähetetään sarjaväylää pitkin kalibrointikomento, menee moduuli automaattiseen kalibrointitilaan. Kalibrointitilan toimintaa kuvaa kuvan 29 keltainen lohko. Kohdassa D2, moduuli laskee kalibrointikertoimen  $A_C$ , kaavalla:

$$A_C = \frac{L_T}{L_S}, \quad (39)$$

jossa  $L_T$  on äänitasokalibraattorin äänenpainetaso [dB], joka on yleensä 94 dB tai 114 dB ja  $L_S$  on mitattu dimensioton suure.  $L_S$  lasketaan  $X_S$ :ien aritmeettisena keskiarvona kaavalla:

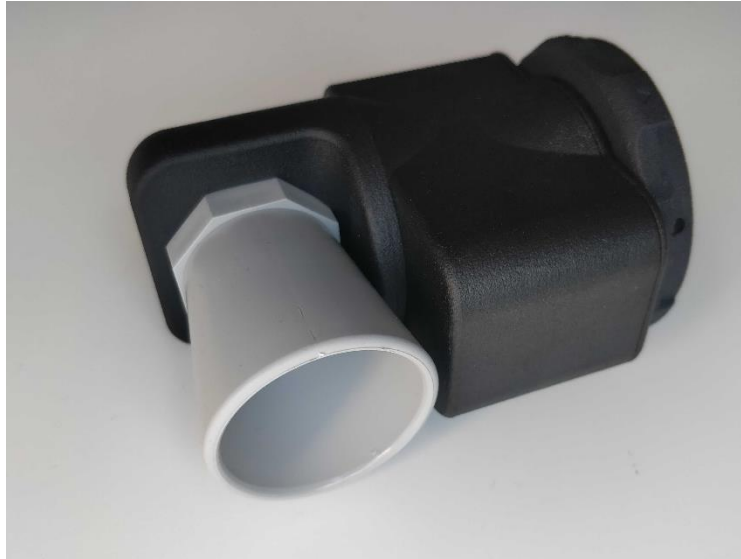
$$L_S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{Si}, \quad (40)$$

jossa  $n$  on keskiarvoistettavien  $X_S$ :ien määrä. Jos  $X_{Si}$  on tietyn määritetyn prosenttiosuuden verran  $X_{S0}$ :aa suurempi tai pienempi, loppuu kalibrointiohjelma virheen palauttaen. Tällä varmistetaan, että kalibroitava signaali on vakaa, jotta  $A_C$  olisi tarkka.  $X_S$  voi muuttua kalibroidessa huomattavasti, esimerkiksi jos mikrofoniin tai äänitasokalibraattoriin koskee. Käytännössä  $n$  määrä  $X_S$ :iä vastaa noin 10 s aikaa. Keskiarvon laskeminen tapahtuu kohdassa D1.  $A_C$  lasketaan aina Z-taajuuspainotuksella.

## 6.3 Moduulin viimeistely

Elektroniikka ja etäisyysanturi sijoitettiin niille suunniteltuun 3D-tulostettuun koteloon. Kotelon suunnittelu ei ollut osa opinnäytetyötä. Etäisyysanturin kulmaa pystyy muuttamaan. Kotelon sivussa on rajapinta BH-12 mittalaitteeseen. Moduuli on suunniteltu

käytettäväksi BH-12:sta vasemmansivun sensoripositiossa, mutta sen voi rajapinnan puolesta kytkeä mihin tahansa positioon. Kuvassa 32 on sensorimoduulin valmis prototyyppi. Mikrofoniliitin sijaitsee moduulin takaosassa. Kuvassa 33 sensorimoduuli on kiinnitettynä Aeromon BH-12:sta. Mittalaite kiinnittyy drooniin hopeanvärisestä metallilevystä.



Kuva 32. Valmis prototyyppi.



Kuva 33. Moduuli kiinnitettynä BH-12 mittalaitteeseen.

## 7 TESTAUS

Äänitasomittarimoduulin suorituskykyä testattiin usealla eri testillä. Rajallisten resurssien takia droonilla suoritettavaa testiä ei kyetty järjestämään. Testeissä 7.1, 7.3 ja 7.4 moduulia verrattiin Norsonic Nor140 -äänitasomittariin, joka oli varustettu Nor1209 -esivahvistimella ja Nor1225 -mikrofonilla. Kummankin äänitasomittarit kalibroitiin Nor1256 -äänitasokalibraattorilla ennen kutakin mittaussessiota. Mittarien annettiin olla päällä noin 5 min ennen kalibroitua, jotta niiden lämpötilat tasaantuivat. Kaikissa testeissä mitattiin  $L_{eqT}$ . Kaikkien mittausten  $T = 10$  s. Mittarin sisäiseksi kohinaksi mitattiin noin 48 dB. Mittari ei kykene mittaamaan tätä hiljaisempia ääniä.

### 7.1 Äänitasokalibraattori

Kummankin mittarin vastetta testattiin Nor1256 -äänitasokalibraattoriin. Testeissä käytettiin kaikkia mahdollisia kalibraattorin taajuus- ja äänenpainetasoyhdistelmiä, ja mittausten taajuuspainotuksia.

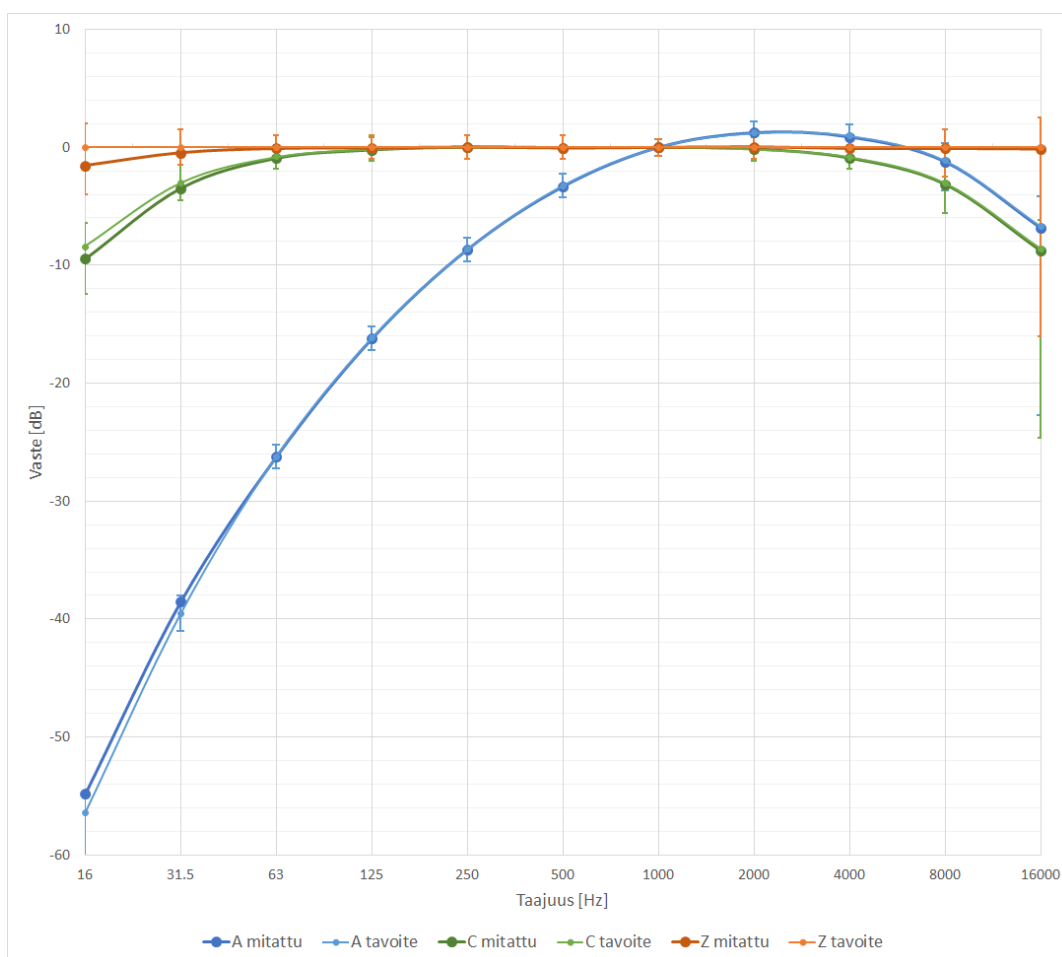
Taulukko 12. Äänitasomittareiden mittaustulokset äänitasokalibraattoriin.

<b>Pain. Mit.</b> <b>Kalib. as.</b>	<b>A Nor</b> <b>[<math>L_{eqT}</math>]</b>	<b>A proto</b> <b>[<math>L_{eqT}</math>]</b>	<b>C Nor</b> <b>[<math>L_{eqT}</math>]</b>	<b>C proto</b> <b>[<math>L_{eqT}</math>]</b>	<b>Z Nor</b> <b>[<math>L_{eqT}</math>]</b>	<b>Z proto</b> <b>[<math>L_{eqT}</math>]</b>
<b>94 dB, 1 kHz</b>	93,9	94,0	94,0	94,0	93,9	94,0
<b>94 dB 250 Hz</b>	85,5	85,6	94,1	94,2	94,1	94,2
<b>114 dB, 1 kHz</b>	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0
<b>114 dB, 250 Hz</b>	105,5	105,6	114,2	114,2	114,2	114,2

Taulukosta 12 huomataan, että mittareiden tulokset ovat todella lähellä toisiaan. Suurin ero tulosten välillä on vain 0,1 dB, tämä ero selittyy jo Nor140:n mittatuloksen esitystarkkuudesta, joka on vain 1 desimaali. 1 kHz taajuudella, kaikkien mittaustulosten tulisi olla kalibraattoriin asetettu taso. 250 Hz taajuudella ja A-painotuksella tuloksen tulisi olla 8,6 dB vähemmän kuin kalibraattoriin asetettu taso. Nor140:lla tulos on 8,5 dB vähemmän ja prototyypillä 8,4 dB vähemmän sekä 94 dB että 114 dB äänenpainetasoilla. Testin perusteella prototyyppi toimii erittäin hyvin, ja on amplitudilineaarinen.

## 7.2 Taajuusvaste

Äänitasomittarimoduulin taajuuspainotusten taajuusvasteita testattiin Agilent 33220A - signaaligeneraattorilla. Mittarin BNC-liittimeen kytkettiin BNC-kaapeli, jonka päähän oli juotettu 3,3 k $\Omega$  vastus. Kappaleessa 5.6.1 GRAS 146AE:n resistanssiksi oli laskettu 3,96 k $\Omega$ . Signaaligeneraattorin kuormaksi asetettiin 3,3 k $\Omega$ , ja generaattori oli AC-tilassa. Generaattori kytkettiin vastuksen yli. Mittauksia tehtiin oktaavin välein, alkaen 16 Hz:n taajuudesta. Kaikki mittaukset tehtiin 70,7 mV<sub>p</sub> amplitudilla, joka vastaa mikrofonin vastetta 1 Pa äänenpaineeseen, paitsi 16 Hz:llä signaalin amplitudi oli 707,1 mV<sub>p</sub>. Tämä tehtiin siksi, että 16 Hz:lla ja A-painotuksella, vaimennus on niin suuri, että signaali hukui kohinaan signaalin amplitudin ollessa 70,7 mV<sub>p</sub>. Kuvaan 34 on merkitty vaaleilla väreillä IEC 61672-1:2013 -standardin tavoitevasteet, sekä standardissa määritetyt virherajat. Mitatut vasteet on merkitty kuvaan tummemmilla väreillä.



Kuva 34. Mittarin taajuusvaste eri taajuuspainotuksilla. (tehty liitteen 2 mittaustuloksista)



Kuvasta 34 ja liitteestä 2 huomataan, että prototyyppi täyttää taajuusvasteen osalta IEC 61672-1:2013 -standardin luokan 1 laitteen vaatimukset.

### 7.3 Kompressor

Testissä mitattiin noin 30 m<sup>2</sup> huoneessa olevan kovaäänisen ilmakompressorin melua. Kompressor valikoitui testiin, koska sen tiedettiin olevan tasainen ja kovaääninen melulähde, joka olisi helposti mitattavissa sisätiloissa. Mittarit asetettiin kolmijalkaan siten, että mikrofonit olivat samassa tasossa yhtä kaukana kompressorista, noin 2 cm etäisyydellä toisistaan. Mikrofonit osoittivat suoraan kompressorin moottoriin. Mittausparit suoritettiin kummallakin mittarilla samanaikaisesti.

Taulukko 13. Kompressorin melun mittaustulokset

Etäisyys [m]	Nor A [L <sub>eqT</sub> ]	Nor Z [L <sub>eqT</sub> ]	Proto A [L <sub>eqT</sub> ]	Proto Z [L <sub>eqT</sub> ]	Ero [dB]
<b>Tausta</b>	39,5		47,6		8,1
<b>1,0</b>	92,4		88,0		-4,4
<b>1,0</b>	93,3		89,4		-3,9
<b>1,0</b>	93,3		90,2		-3,1
<b>2,0</b>	91,5		87,6		-3,9
<b>2,0</b>	91,4		85,0		-6,4
<b>1,0</b>		95,0		91,5	-3,5
<b>1,0</b>		93,8		91,7	-2,1

Taulukosta 13 huomataan, että A-painotuksella prototyypin tulos on keskimäärin noin -4,3 dB vähemmän kuin Nor140:n. Z-painotuksella ero on keskimäärin noin -2,8 dB. Taustamittauksesta huomataan, että prototyypin kohina on huoneääntä korkeampi. Näin ollen prototyypin taustamittaus ei pidä paikkaansa.

### 7.4 Auton moottori

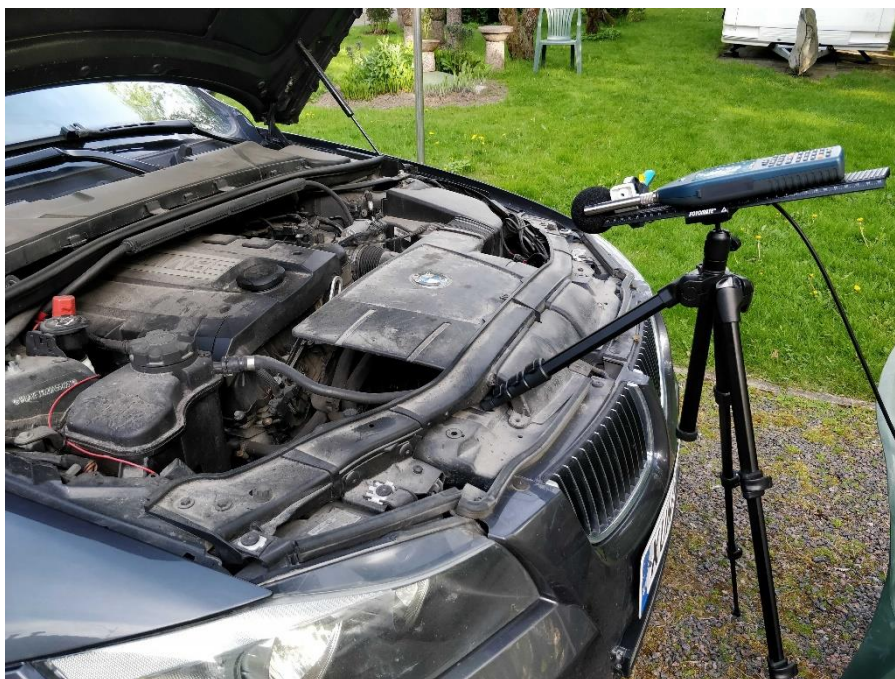
Testissä mitattiin BMW N43B16 -auton moottorin melua noin 70 cm etäisyydeltä moottorista. Moottori valikoitui mittaushaasteeksi, koska sen mittaaminen oli ulkoilmassa helppoa. Lisäksi moottorin tiedettiin olevan hiljaisempi kuin luvun 7.3 kompressor, jolloin

näitä kahta mittausta vertaamalla saadaan testattua myös mittarin amplitudilineaarisuutta. Mittareiden väleillä vuoroteltiin ja mikrofoneissa käytettiin samaa tuulisuojaa. Moottorimelun tasaisuutta arvioitiin moottorin kierrosnopeutta ja jäähdytyspuhaltimen tiilaa seuraamalla. Moottorin kierrosnopeus oli noin 800 rpm jokaisessa mittauksessa, ja jäähdytyspuhallin pyöri hiljaisella nopeudella.

Taulukko 14. Auton moottorin melun mittaustulokset.

Mit. Pain. Mittaus	Nor A [L <sub>eqT</sub> ]	Nor Z [L <sub>eqT</sub> ]	Proto A [L <sub>eqT</sub> ]	Proto Z [L <sub>eqT</sub> ]	Ero A [dB]	Ero Z [dB]
Tausta	48,4	67,1	50,1	58,9	1,7	-17
Mittaus 1	72,2	79,8	67,4	78,0	-4,8	-1,8
Mittaus 2	72,3	79,8	67,5	77,4	-4,8	-2,5

Taulukon 14 mittaustuloksista huomataan, että ero Nor140:n ja prototyypin mittaustulosten välillä on johdonmukainen luvun 7.3 kompressorimittauksen kanssa. Kuvassa 35 on mittausjärjestely. Mikrofoneihin ei käsituntumalla välittynyt mekaanista värinää, vaikka kolmijalka oli autossa kiinni.



Kuva 35. BMW N43B16 -moottorin mittausjärjestely.

## 8 POHDINTAA

Äänitasomittarin suorituskyky on hyvä luvun 7 mittaustulosten perusteella. Kaikkien taajuuspainotusten vasteet täyttivät tavoitellun IEC 61672-1:2013 -standardin luokan 1 laitteen taajuusvasteet. Kun mitattava signaali koostui vain yhdestä taajuuskomponentista, oli mittarin vaste lähes identtinen Norsonic Nor140 -äänitasomittarin kanssa. Tämä on merkittävä tulos, sillä Nor140 maksaa tuhansia euroja, ja prototyyppiin käytetyt osat vain noin 200 euroa (pl. etäisyysanturi ja mikrofoni). Kun signaali oli oikeaa melua, koostuen useasta eri taajuudesta, näytti prototyyppi A-painotuksella noin 4,5 dB ja Z-painotuksella noin 2,5 dB pienempää  $L_{eqT}$  lukemaa kuin Nor140. Erosta ei voida tietää, että kumpi mittari on "väärässä". Käytettyjen mikrofonien taajuusvasteet eivät ole identtiset. Ero saattaa johtua siitä, että käytetyssä audio-signaalinkäsittelyohjelmistossa taajuuskomponenttien vaihetieto hävitetään, FFT:n ja IFFT:n välissä. En kuitenkaan usko, että ero johtuisi tästä, sillä kaikkien taajuuskomponenttien jaksonaika mahtuu aikatasoon. Jaksoillisten sini-signaalien summan itseisarvon integraali on lähestulkoon sama, sinien vaihe-eroista riippumatta, jos kaikkien signaalien jaksot mahtuvat useamman kerran integroitavaan aikaan. Lukujen 7.3 ja 7.4 mittaustuloksia vertaamalla huomataan, että ero mittarien mittaustuloksissa on samansuuruinen. Tästä voidaan päätellä, että mittari on ainakin näillä kahdella äänitasolla amplitudilineaarinen. Luvun 7.2 mittauksista yksi tehtiin 10 kertaisella tasolla muihin verrattuna, ja vaste säilyi samana. Tämäkin todistaa mittarin olevan amplitudilineaarinen.

Mittaria voisi parantaa usealla tapaa. Kaikkien eri taajuuspainotusten tulokset voisi laskea rinnakkain. PocketBeaglen suorituskyvyn pitäisi riittää tähän. Tällöin käyttäjän ei tarvitsisi mittausvaiheessa valita painotusta, vaan käyttäjä voisi lopuksi valita mittausraporttiinsa tuloksen haluamillaan painotuksilla. Mittarin kohinatasoa tulee ehdottomasti mataltaa. Nykyinen kohinataso on juuri ja juuri riittävä droonimittauksiin. Kohinatason pienentämisen myötä A/D-muuntimen toista kanavaa voisi käyttää hiljaisempien äänien mittaamiseen dynaamisen alueen kasvattamiseksi.

## 9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella, rakentaa ja testata äänitasomittarimoduulin prototyyppi Aeromon BH-12 päästöjen mittalaitteeseen. Tavoitteena oli saavuttaa IEC 61672-1:2013 -standardin luokan 1 laitteen suorituskäyvaatimuksia, etenkin taajuusvasteen osalta. Äänitasomittarin elektroniikka toteutettiin PocketBeagle-, ja Bela Mini -kehityskorteilla. Lisäksi suunniteltiin piirilevy, jolla kondensaattorimikrofoni saatiin toimimaan järjestelmässä. Piirilevy testattiin, ja sen todettiin toimivan niin kuin sen oli suunniteltu toimivan. Äänitasomittarille kehitettiin ohjelmisto, joka muuttaa A/D-muuntimelta tulevan mikrofoniin digitaalisen jännitesignaalin ekvivalentiksi äänitasoksi  $L_{eqT}$ . Mittariin toteutettiin standardinmukaiset A, C ja Z -taajuuspainotukset, sekä F ja S -aikapainotukset.

Mittari vaati myös etäisyysanturin. Etäisyysanturiksi valittiin MaxBotix MB7076 -ultraäänianturi. Ultraäänianturille kehitettiin ohjelmisto, joka tunnistaa anturin analogisesta signaalista anturin mittaamat kohteet. Anturia testattiin useilla testeillä, ja sen suorituskäyky todettiin hyväksi ja käyttötarkoitukseen sopivaksi.

Valmiin mittarin suorituskäykyä testattiin useilla eri testeillä. Mittarin taajuusvastetta testattiin äänitasokalibraattorilla, sekä signaaligeneraattorilla. Taajuusvasteen todettiin täyttävän IEC 61672-1:2013 -standardin luokan 1 vaatimukset. Lisäksi mittaria verrattiin Norsonic Nor140 -äänitasomittariin. Testeissä osoittautui, että mittari näyttää noin 4 dB pienempää  $L_{eqT}$ -tasoa, kuin Nor140. Tuloksesta ei voida tietää, kumpi mittari on väärässä. Testien perusteella työssä saavutettiin äänitasomittarille asetetut tavoitteet. Mittarin merkittäväksi ongelmaksi muodostui mittarin sisäinen kohina, joka on noin 48 dB. Opinnäytetyössä tehtyä prototyyppiä tullaan jatkokehittämään standardinmukaiseksi laitteeksi.

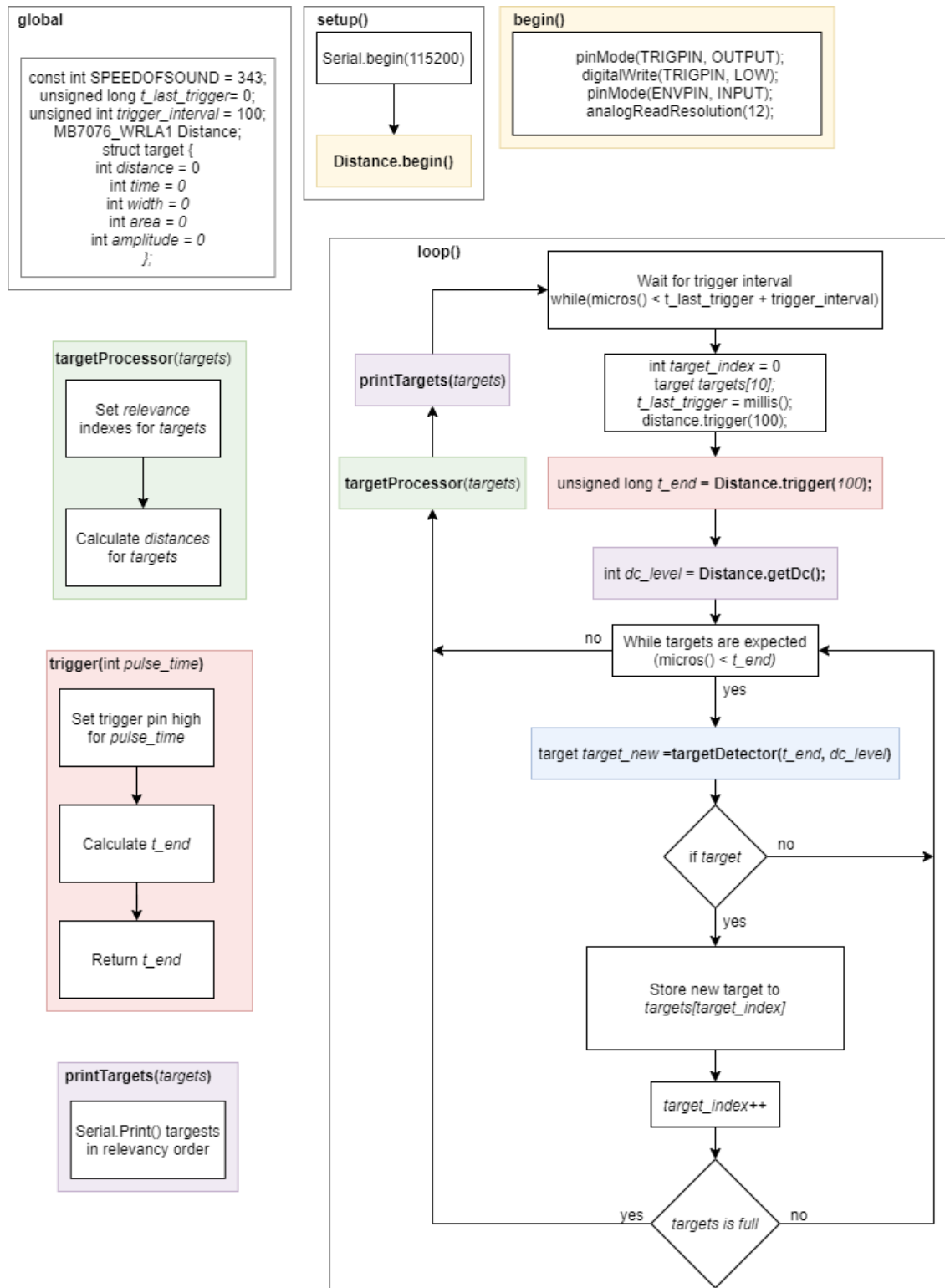
Työssä perehdyttiin myös melumittaamiseen droonilla. Aiheesta ei löytynyt aiempaa kirjallisuutta, yhtä Aeromon Oy:lle toteutettua VTT:n raporttia lukuun ottamatta. Droonien melua itsessään on tutkittu runsaasti. Tutkimusten mittaustuloksista pääteltiin, että melumittaaminen droonilla on mahdollista, jos melulähde on tarpeeksi voimakas. Droonin liikkuminen melumittauksen aikana aiheuttaa epävarmuutta mittaukseen. Ongelmaan keksittiin ratkaisu opinnäytetyötä tehtäessä. Ratkaisuna droonin etäisyyttä melulähteeseen mitataan synkronisesti melun kanssa, jolloin melumittaus voidaan kompensoida kunkin ajanhetken etäisyydellä erikseen. Näin ollen etäisyyden muuttumisesta ajan funktiona johtuvaa epävarmuutta voidaan pienentää merkittävästi.

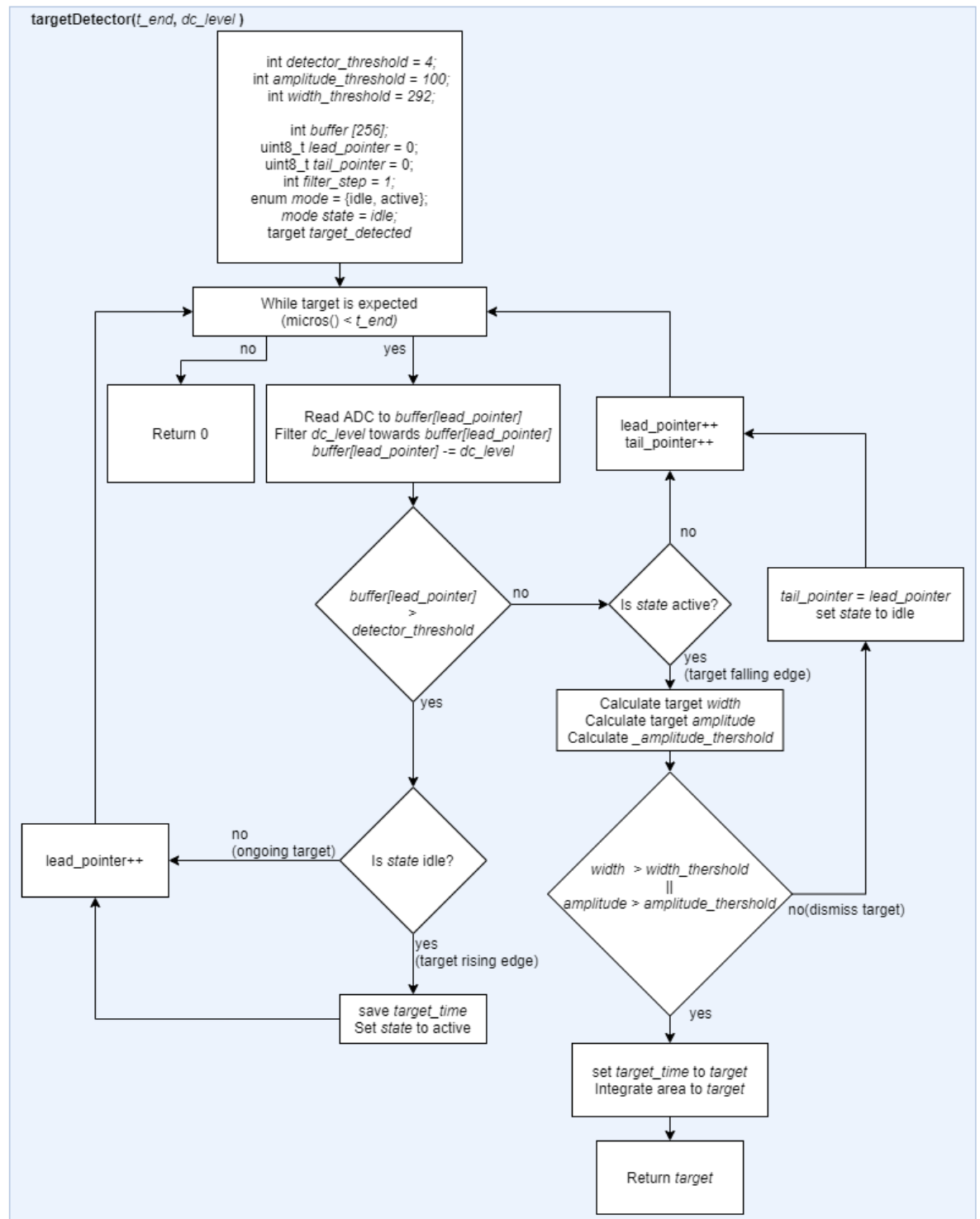
## LÄHTEET

- [1] IEC, IEC 61672-1:2013 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications, 2013.
- [2] M. Heikkinen, "Äänentasomittari -Insinööritoiminta," Kajaanin ammattikorkeakoulu, Kajaani, 2008.
- [3] Aeromon Oy, BH-12 Emission measuring device -datalehti.
- [4] H. Young ja R. Freedman, University Physics with Modern Physics 4th ed, Pearson Education, 2016.
- [5] D. Bies ja C. Hansen, "Engineering Noise Control - Theory and Practice, 4th ed," New York, CRC Press, 2009, p. 768.
- [6] H. Cyril, "ABSORPTION OF SOUND IN AIR VERSUS HUMIDITY AND TEMPERATURE," NASA, New York, 1967.
- [7] C. Nugent, N. Blanes, J. Fons, M. Sáinz, M. Ramos, F. Domingues, A. Beek ja H. D, "Noise in Europe 2014," Euroopan ympäristökeskus, Kööpenhamina, 2014.
- [8] S. Gerges, S. Gustav ja P. Wolfgang, "Noise Sources," [Online]. Available: [https://www.who.int/occupational\\_health/publications/noise5.pdf](https://www.who.int/occupational_health/publications/noise5.pdf). [Haettu 18 4 2020].
- [9] NTi Audio AG, "Fast, Slow, Impulse Time Weighting - What do they mean?," [Online]. Available: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-slow-impulse-time-weighting-what-do-they-mean>. [Haettu 19 5 2020].
- [10] K. Okutan, Y. Takami, N. Keisuke ja N. Kazuhiro, "Outdoor auditory scene analysis using a moving microphone array embedded in a quadrocopter," tekijä: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, 2012.
- [11] M. Basiri, F. Schill, P. U. Lima ja D. Floreano, "Robust acoustic source localization of emergency signals from Micro Air Vehicles," tekijä: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, 2012.
- [12] L. Wang ja A. Cavallaro, "Acoustic Sensing From a Multi-Rotor Drone," IEEE Sensors Journal, osa/vuosik. 18, nro 11, pp. 4570-4582, 2018.
- [13] L. Cavallaro ja W. a. A, "Ear in the sky: Ego-noise reduction for auditory micro aerial vehicles," tekijä: 2016 13th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), Colorado Springs, 2016.
- [14] B. Kang, H. Ahn ja H. Choo, "A Software Platform for Noise Reduction in Sound Sensor Equipped Drones," IEEE Sensors Journal, osa/vuosik. 19, nro 21, pp. 10121-10130, 2019.
- [15] P. Majjala, "Kopterin äänenkarakterisointi ja soveltuvuus ympäristömelumittauksiin," VTT, Tampere, 2019.
- [16] S. Z. Nikolas, C. Andrew ja C. Randolph, "A Summary of NASA Research Exploring the Acoustics of Small Unmanned Aerial Systems," NASA, Hampton, 2018.

- [17] N. Kloet, W. Simon ja A. C. Reece, "Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems," International Journal of Micro Air Vehicles, 2017.
- [18] I. Nanyaporn, N. A. William, D. William, G. Sheryl ja D. Amanda, "Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions," tekijä: 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Lyon, 2016.
- [19] ISO, ISO 3744:2010 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane, 2010.
- [20] Deutsches Institut für Normung, DIN 45-635-47 Measurement of noise emitted by machines, ISO, 1985.
- [21] GRAS Sound & Vibration A/S, "GRAS 146AE 1/2" CCP Free-field Microphone set," [Online]. Available: [https://www.gras.dk/products/measurement-microphone-sets/constant-current-power-ccp/product/ss\\_export/pdf2?product\\_id=771](https://www.gras.dk/products/measurement-microphone-sets/constant-current-power-ccp/product/ss_export/pdf2?product_id=771). [Haettu 21 4 2020].
- [22] MaxBotix Incorporated, XL-MaxSonar®-WR/WRC™ Series -datalehti, USA, 2017.
- [23] MaxBotix Incorporated, "MB7076 XL-MaxSonar-WRLA1," [Online]. Available: [https://www.maxbotix.com/Ultrasonic\\_Sensors/MB7076.htm](https://www.maxbotix.com/Ultrasonic_Sensors/MB7076.htm). [Haettu 5 6 2020].
- [24] BeagleBoard.org, "System Reference Manual," [Online]. Available: <https://github.com/beagleboard/pocketbeagle/wiki/System-Reference-Manual>. [Haettu 21 4 2020].
- [25] Texas Instruments, TLV320AIC3104-datalehti, 2016.
- [26] linear Technology Corporation, LT1610 1.7MHz, Single Cell Micropower DC/DC Converter -datalehti, 1998.
- [27] Texas Instruments, IEPE Sensor Analog Front-End With Digital Interface Reference Design, 2018.
- [28] Texas Instruments, TL431 / TL432 Precision Programmable Reference -datalehti, 2018.
- [29] Texas Instruments, OPA164x SoundPlus™ High-Performance, JFET-Input Audio Operational Amplifiers -datalehti, 2016.
- [30] S. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing 1st ed, California Technical Pub, 1997.
- [31] National Instruments Corporation, The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement, 2000.

# Etäisyysanturin sulautetun ohjelmiston pseudokoodi lohkokaavio







Taajuusvastemittaukset eri taajuuspainotuksille

Taajuus	Mittattu taajuusvaste			Tavoite taajuusvaste			Ero (tavoite – mitattu)			Sallittu ero, l. 1	
[Hz]	A [dB]	C [dB]	Z [dB]	A [dB]	C [dB]	Z [dB]	A [dB]	C [dB]	Z [dB]	+ [dB]	– [dB]
16	–54,80	–9,47	–1,54	–56,43	–8,43	0,00	1,63	–1,04	–1,54	2	4
31,5	–38,51	–3,48	–0,46	–39,53	–3,03	0,00	1,02	–0,45	–0,46	1,5	1,5
63	–26,23	–0,94	–0,11	–26,22	–0,82	0,00	0,00	–0,12	–0,11	1	1
125	–16,22	–0,23	–0,06	–16,19	–0,17	0,00	–0,03	–0,06	–0,06	1	1
250	–8,66	0,01	0,01	–8,67	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1	1
500	–3,32	–0,04	–0,07	–3,25	0,03	0,00	–0,07	–0,07	–0,07	1	1
1000	–0,02	–0,02	–0,02	0,00	0,00	0,00	–0,02	–0,02	–0,02	0,7	0,7
2000	1,23	–0,14	0,03	1,20	–0,17	0,00	0,03	0,03	0,03	1	1
4000	0,86	–0,93	–0,10	0,96	–0,83	0,00	–0,10	–0,10	–0,10	1	1
8000	–1,25	–3,15	–0,11	–1,15	–3,05	0,00	–0,11	–0,11	–0,11	1,5	2,5
16000	–6,86	–8,79	–0,16	–6,71	–8,63	0,00	–0,16	–0,16	–0,16	2,5	16